

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MATEMATICKÝ MODEL KLIMATICKÉ KOMORY

MATHEMATICAL MODEL OF A CLIMATIC CHAMBER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Hort

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Veselý, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Tomáš Hort

**ID:** 195316

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Matematický model klimatické komory

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zvolte vhodné snímače pro měření teploty a vlhkosti.
2. Navrhněte způsob zpracování měřených veličin.
3. Navrhněte matematický model klimatické komory – líhně.
4. Ověřte navržený matematický model.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Soderstrom, T., Stocia, P.: System identification. Prentice Hall International Series in Systems and Control Engineering. UK. July 1989. 528s. ISBN 978-0138812362

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Libor Veselý, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem bakalářské práce je návrh a ověření matematického modelu klimatické komory - líhně. V jejím úvodu je popsán komunikační protokol I2C. Dále jsou rozebírány snímače teploty a relativní vlhkosti. Pro zpracování dat je použit měřicí a řídicí systém CompactRio, pro programování je využit program Labview. Identifikace soustavy a návrh matematického modelu je provedena v System Identification Toolboxu Matlabu. V další části práce jsou rozebrány způsoby přenosu tepla. Pro sestavení fyzikálního modelu v Simulinku – Simscape Thermal byla využita provedená tepelná analýza soustavy. Poslední kapitola se věnuje vytvoření kompaktního dataloggeru, určeného pro dlouhodobý záznam měření v líhni.

## **Klíčová slova**

I2C, matematický model, SHT85, CompactRio, identifikace soustavy, System Identification Toolbox, Simscape

## **Abstract**

The objectives of this bachelor thesis are designed and verification mathematical model climatic chamber - incubator. In the beginning, the I2C communication bus is described. Then, the humidity and temperature sensors are analysed. Measuring and controlling system CompactRio is used for processing data, program Labview is used for programming. Identification of system and designing mathematical model is accomplished in System Identification Toolbox. In the next part, the methods of heat transfer are discussed. The thermal analysis of the system was used to build a physical model in Simulink - Simscape Thermal. The last chapter is focused to the creation of a compact datalogger designed for long-term recording of measurements in an incubator.

## **Keywords**

I2C, mathematical model, SHT85, CompactRio, identification of system, System Identification Toolbox, Simscape

## **Bibliografická citace:**

HORT, Tomáš. *Matematický model klimatické komory*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127001>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Libor Veselý.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Matematický model klimatické komory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2020

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Liborovi Veselému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 25. května 2020

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	13
2	I2C sběrnice .....	14
2.1	Vlastnosti .....	14
2.2	Typické uspořádání zařízení .....	14
2.3	Komunikační protokol.....	15
2.3.1	Start/Stop .....	15
2.3.2	Datová zpráva.....	16
2.3.3	ACK/NACK.....	16
3	Komunikační prostředí .....	17
3.1	Labview .....	17
3.2	CompactRio.....	18
3.2.1	FPGA.....	19
3.2.2	Real-Time procesor.....	20
3.2.3	Použitá konfigurace přístrojů .....	20
4	Snímače teploty a vlhkosti .....	21
4.1	Měření teploty a vlhkosti.....	21
4.2	HTU21D .....	23
4.3	Sensirion .....	23
4.3.1	SHT10, SHT31 .....	24
4.3.2	SHT85.....	24
4.4	Porovnání snímačů .....	26
5	Příprava na měření .....	27
5.1	Popis klimatické komory .....	27
5.2	Navazování komunikace .....	28
5.2.1	Práce s jedním snímačem .....	28
5.2.2	Práce s více snímači .....	29
5.3	Zapojení úlohy .....	30
5.4	Práce v Labview .....	31
6	Matematický model soustavy .....	33
6.1	Popis regulačního obvodu.....	33
6.2	Identifikace soustavy .....	33
6.3	Experimentální měření .....	34
6.4	Identifikace v Matlabu .....	35
6.5	Výsledný matematický model.....	38
7	Modelování v Simscapu.....	39
7.1	Softwarové prostředí Simscape .....	39
7.2	Tepelná výměna vedením .....	39



7.3	Tepelná výměna prouděním .....	39
7.4	Tepelná výměna zářením .....	40
7.5	Výpočet tepelných přenosů .....	40
7.6	Analýza tepelné výměny v líhni .....	41
7.7	Parametry modelu - fyzikální veličiny .....	43
7.8	Výsledky a porovnání.....	45
8	Vytvoření dataloggeru .....	47
8.1	Hardware.....	47
8.2	Software .....	49
8.3	HAL API .....	51
9	Závěr.....	52
	Literatura .....	53
	Seznam příloh.....	56

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

## Zkratky<sup>1</sup>:

I2C	-	Inter-Integrated Circuit
SDA	-	Serial Data
SCL	-	Serial Clock
VI	-	Virtual Instruments – virtuální nástroje
I/O	-	Input and Outputs – vstupy a výstupy
RAM	-	Random Access Memory - paměť s náhodným přístupem
FPGA	-	Field-programmable gate array – programovatelné hradlové pole
PLD	-	Programmable Logic Device – programovací logické zařízení
RTOS	-	Real Time Operating System – operační systém reálného času
DRAM	-	Dynamic random access memory – dynamická paměť s přímým přístupem
AC/DC	-	Alternating current/Direct current – střídavý proud / stejnosměrný proud
CMOS	-	Complementary Metal Oxide Semiconductor
APS	-	Automatic Pumping System – automatický čerpací systém
CRC	-	Cyclic Redundancy Check - Cyklický redundantní součet
ACK	-	Acknowledgement – pozitivní potvrzení
NACK	-	Negative Acknowledgement – negativní potvrzení
USB	-	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice
PC	-	Personal Computer – osobní počítač
SWD	-	Serial Wire Debug - Ladění sériového vedení
GND	-	Ground - zem
VCC	-	Voltage at the common collector - napětí na společném kolektoru

---

<sup>1</sup> Část pojmů je uvedena pouze v anglickém jazyce, český překlad nemá význam.

RTC	-	Real-Time Clock – hodiny reálného času
ARM	-	Advanced RISC Machine - pokročilý stroj RISC
HAL	-	High Abstraction Layer - vrstva s vysokou abstrakcí
LL	-	Low-layer - nízká vrstva
API	-	Application Programming Interface - rozhraní pro programování aplikací
USART	-	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter – univerzální synchronní / asynchronní přijímač-vysílač
UART	-	Universal asynchronous receiver-transmitter - univerzální asynchronní přijímač-vysílač
DMA	-	Direct Memory Access - přímý přístup do paměti

Všechny použité symboly a veličiny jsou vysvětleny přímo na místě použití.

# Seznam obrázků

Obr. 2.1 Typické zapojení zařízení na sběrnici I2C .....	14
Obr. 2.2 Příklad komunikace na sběrnici I2C [3] .....	15
Obr. 3.1 Labview – Čelní panel.....	17
Obr. 3.2 Labview – Blokový diagram.....	18
Obr. 3.3 CompactRio .....	19
Obr. 3.4 Architektura CompactRio [16][17] .....	19
Obr. 4.1 Měření relativní vlhkosti [5] .....	21
Obr. 4.2 Měření teploty [6] .....	22
Obr. 4.3 Konstrukce snímače relativní vlhkosti a teploty [7] .....	23
Obr. 4.4 Rozmístění pinů na snímači SHT85 [10] .....	24
Obr. 5.1 Pracoviště.....	27
Obr. 5.2 Klimatická komora - líheň .....	27
Obr. 5.3 Pracovní schéma líhně .....	28
Obr. 5.4 Demonstrace nedostatečně nízké napěťové úrovně linky SDA .....	29
Obr. 5.5 Komunikace s multiplexerem PCA9547 [18] .....	30
Obr. 5.6 Elektronické zapojení úlohy .....	31
Obr. 5.7 Blokový diagram Real-Time programu .....	32
Obr. 6.1 Schéma regulačního obvodu [13] .....	33
Obr. 6.2 Měření identifikační sady dat.....	35
Obr. 6.3 System Identification Toolbox.....	36
Obr. 6.4 Transfer Function Models.....	37
Obr. 6.5 Validační data 1 - ohřívání.....	37
Obr. 6.6 Validační data 2 – samovolné ochlazování.....	38
Obr. 7.1 Situační schéma líhně.....	42
Obr. 7.2 Schéma fyzikálního modelu - Simscape .....	42
Obr. 7.3 Průběhy hodnot teplot pro vytvoření fyzikálního modelu .....	43
Obr. 7.4 Parametry bloku pro nastavení tepelné hmoty .....	44
Obr. 7.5 Srovnání naměřených a modelových hodnot teploty v komoře 1 .....	45
Obr. 7.6 Srovnání naměřených a modelových hodnot teploty v komoře 2 .....	46
Obr. 8.1 Konfigurace pinů NUCLEO STM32L412KB [35] .....	48
Obr. 8.2 Hardware pro datalogger .....	49
Obr. 8.3 Hardwarová konfigurace dataloggeru .....	50
Obr. 8.4 Prostředí Atollic TrueSTUDIO s částí použitého kódu .....	50
Obr. 8.5 Ukázka souboru uloženého na SD kartě.....	51

## Seznam tabulek

Tab. 4.1 Příkazy pro snímač v Single Shot režimu .....	25
Tab. 4.2 Příkazy pro snímač v režimu periodického čtení .....	25
Tab. 4.3 Vlastnosti I2C snímačů relativní vlhkosti a teploty .....	26

# 1 ÚVOD

S rozvojem kybernetiky nachází vytváření modelů uplatnění v mnoha oborech. Jelikož často nejsme schopni procesy reálného světa zcela vysvětlit, musíme se při modelování omezit pouze na otázky, které alespoň částečně souvisí s použitím statistických metod. Jedním z cílů tohoto zobrazování skutečnosti může být vytvoření popisu umožňujícího objevovat vysvětlení a souvislosti, které lze částečně zobecnit. Velmi důležité ovšem je, aby popis neopravoval nebo neodstraňoval chyby, které způsobuje samotná nedokonalost modelu. Podle své podstaty se modely dělí do dvou skupin. Matematické modely jsou vyjádřením zkoumané soustavy pomocí matematického popisu, fyzikální modely přímo vychází z fyzikálních vlastností a zákonitostí soustavy. [4]

Bakalářská práce se zabývá modelováním klimatické komory - líhně. Text začíná popisem použitého komunikačního protokolu I2C. Pro zpracování komunikace byly použity prostředky National Instruments: měřicí a řídicí systém CompactRio ve spolupráci s programovacím prostředím Labview. Nutností byl výběr teplotních a vlhkostních snímačů vhodných pro danou aplikaci v testované líně. Následně je popsána vlastní realizace: výběr snímačů, testování komunikace, zkoumání funkčnosti Labview a hardwarových možností použitých zařízení. Práce se dále zabývá způsoby získání vhodných dat pro identifikaci soustavy a návržení matematického modelu pomocí nadstavby Matlabu – System Identification Toolboxu. Následuje teoretický rozbor tepelných přenosů v líně a vytvoření fyzikálního modelu v Simulinku – Simscape Thermal. Poslední část práce se věnuje vytvoření dataloggeru, navrženého pro komplexnější pochopení zkoumané soustavy.

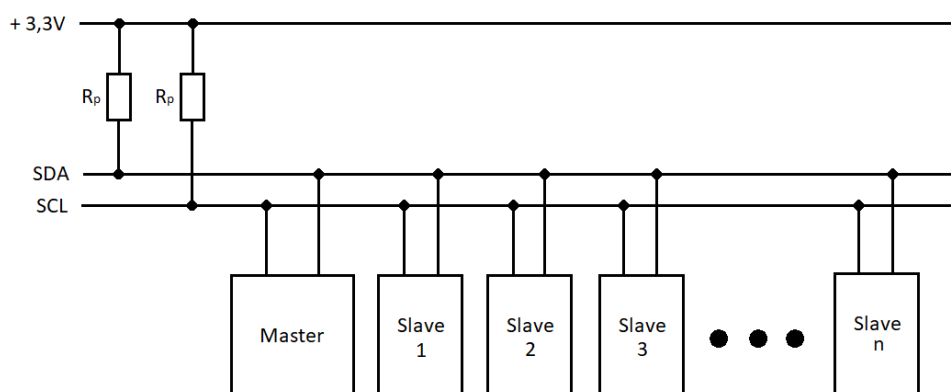
## 2 I2C SBĚRNICE

Tento obousměrný “dvouvodičový” komunikační bus byl vyvinut společností Philips na začátku 80. let 20. století. I2C, podobně jako u dalších typů komunikace např. SPI, RS-485, Ethernet a mnohých dalších, využívá sériového přenosu dat. Informace jsou přenášeny postupně v řadě za sebou pomocí jednoho signálu.

### 2.1 Vlastnosti

Komunikace I2C umožňuje komunikaci mezi jedním nebo více řídicími zařízeními (typ multimaster) a jednou nebo více periferiemi (slavy). Jejich maximální počet závisí na zvoleném typu adresování. Komunikace umožňuje dva typy. Pro standardní sedmi bitové adresování slavů, v praxi častěji využívané, platí maximální zapojení 128 zařízení (včetně masterů) a pro deseti bitové adresování platí maximální zapojení 1024 všech zařízení na sběrnici. Počet všech zařízení je také definován maximální parazitní kapacitou obvodu do 400 pF. Ke správné funkci jsou zapotřebí 2 linky – datová (SDA) a clocková (SCL). Po SDA probíhá přenos dat a po SCL přenos hodinového signálu. Každé zařízení na sběrnici má svou unikátní adresu. Data mohou být přenášena rychlostí až 3,4 Mbit/s. Standardně se využívá rychlosti 100 kbit/s. Sběrnice rozlišuje dvě logické úrovně napětí. Za vysokou úroveň je sběrnici považováno více než 0,7 násobku a za nízkou méně než 0,3 násobku napájecího napětí. [1,2]

### 2.2 Typické uspořádání zařízení



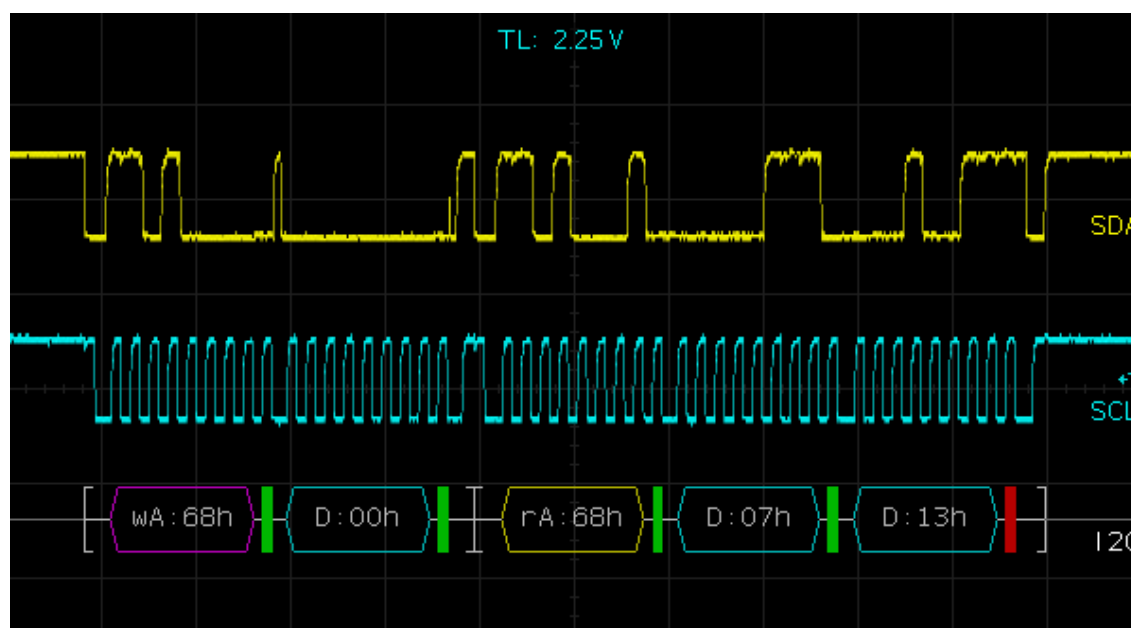
Obr. 2.1 Typické zapojení zařízení na sběrnici I2C

Pro danou architekturu komunikace, zachycenou na obr. 2.1, je nezbytné zapojení zdvihacích (pull-up) rezistorů, které se nacházejí mezi SDA/SCL a napájecím napětím. Pro komunikaci je použit výstup typu otevřený kolektor. Toto

obvodové zapojení umožňuje buď připojení vodiče k potenciálu země (přenos nízké logické úrovně), nebo jeho uvolnění pomocí zdvihacích rezistorů (přenos vysoké logické úrovně). Logická „1“ je přenášena v době, kdy je sběrnice volná, neboli žádné zapojené zařízení netáhá úroveň napětí dolů. To mimo jiné umožňuje souběžné operace více masterů připojených na sběrnici nebo tzv. protahování, kdy slave zařízení mohou pozdržet komunikaci podržením nízké úrovně na SCL. [1]

## 2.3 Komunikační protokol

Jak již bylo zmíněno výše, komunikace I2C probíhá na dvou linkách. Datová linka SDA může přenášet adresy zařízení, příkazy, kontrolní součty, naměřené hodnoty, informace o startu/stopu komunikace a další. Linka SCL slouží pro přenos hodinového signálu, který vždy generuje master. Zpráva na datové lince se vždy skládá z osmi bitů. Následující devátý bit je potvrzovací. Příklad komunikace je na obr. 2.2. [1]



Obr. 2.2 Příklad komunikace na sběrnici I2C [3]

### 2.3.1 Start / Stop

Komunikaci na sběrnici vždy iniciuje master. V klidovém stavu se obě linky (SDA, SCL) drží v log. 1. Pro navázání spojení master musí stáhnout linku SDA do log. 0, zatímco SCL je stále v log. 1 – sekvence START. Poté následuje libovolná komunikace. Jakmile na lince SDA přestane jakékoli zařízení vysílat, master vyvolá sekvenci STOP. SDA je vytažena do log. 1 právě ve chvíli, kdy je SCL v log. 1. [1]

Jakákoli změna hodnoty na lince SDA v době, kdy je linka SCL v log. 1, tedy vyvolá jednu z těchto dvou popsaných sekvencí.



### **2.3.2 Osmibitový formát**

Po vyslání sekvence START následuje osm bitů nesoucích datové informace. První odeslaný bit je nejvíce významný, poslední bit je nejméně významný. Nejprve je třeba vyslat adresu slave zařízení (sedm bitů) a pokyn pro čtení nebo zápis (jeden bit). Tento osmý bit je vyhrazen pro informaci, zda bude master po zbytek komunikace vysílat – log. 0, nebo přijímat – log. 1. Po navázání komunikace může být obsahem datové zprávy pokyn pro slave zařízení, zpráva od slave zařízení, checksum nebo status zařízení. [1]

### **2.3.3 ACK / NACK**

Po odvyslání datové zprávy vysílač odešle devátý kmit na lince SCL, zatímco linku SDA ponechá prázdnou. Tento potvrzovací bit dává přijímači prostor pro odeslání informace o stavu doručení datové zprávy. Pokud je zpráva v pořádku přijata, je SDA stažena (log. 0 - ACK). Naopak vytažení sběrnice (log. 1 - NACK) může nastat v následujících případech: [1]

- Zařízení není schopno přijímat ani vysílat z důvodu momentálního zaneprázdnění.
- Během přenosu přijímač obdržel data nebo příkazy, kterým nerozuměl.
- Přijímač není schopen přijmout další data nebo příkazy během probíhajícího přenosu.
- Master v roli přijímače informuje slave zařízení o tom, že přijal všechna obdržená data.

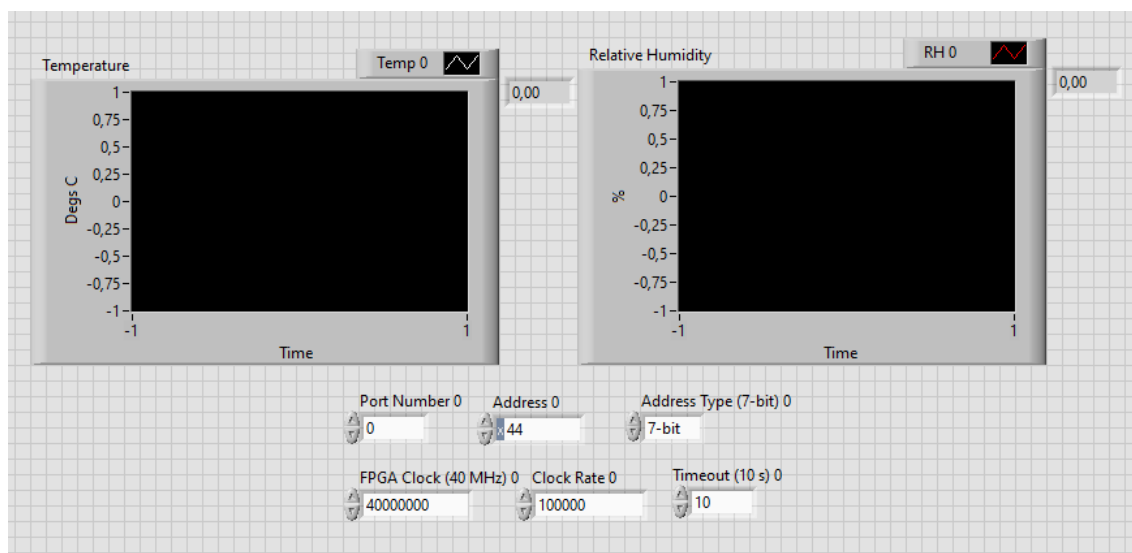
## 3 KOMUNIKAČNÍ PROSTŘEDÍ

Pro zajištění komunikačního rozhraní jsem využil produkty společnosti National Instruments. Firma se zabývá zpracováním aplikací v oblastech testování, řízení a vestavných systémů. Pro práci jsem potřeboval jejich programovací software Labview a modulární hardware, který poskytuje velmi široké využití.

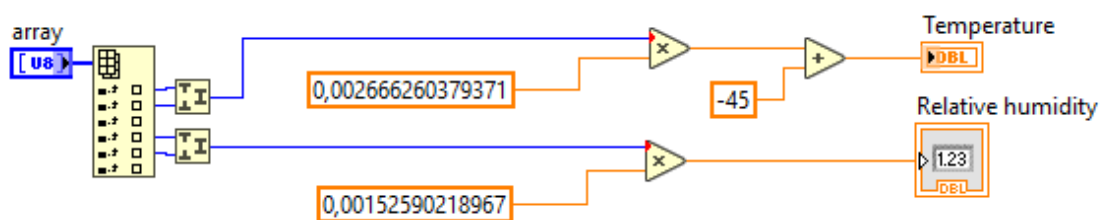
### 3.1 Labview

Labview je softwarový produkt určený pro programování. Pro svou funkčnost využívá tzv. virtuální instrumentace, což je pojem pro pojmenování náhrady hardwarových přístrojů softwarovými prostředky. Programovacím jazykem je tzv. jazyk G – grafický. Využívá jednoduchých bloků nebo složitějších soustav bloků, které jsou součástí rozmanitých knihoven. Oproti klasickým textovým programovacím jazykům, ve kterých je kód lineárně vykonáván řádek po řádku, se zde využívá řízení datovým tokem.

Jednotlivé soubory, resp. programy, se kterými Labview pracuje, mají název podle své přední funkce, virtuální instrumenty neboli VI. Celá VI struktura je kompletní, pokud se skládá ze dvou základních částí – čelního panelu (obr. 3.1) a blokového diagramu (obr. 3.2). Na čelním panelu se zobrazuje vizualizace pro koncového uživatele, který zde může ovládat vstupní hodnoty a indikovat výstupy v závislosti na účelu dané aplikace. [14,15]



Obr. 3.1 Labview - Čelní panel



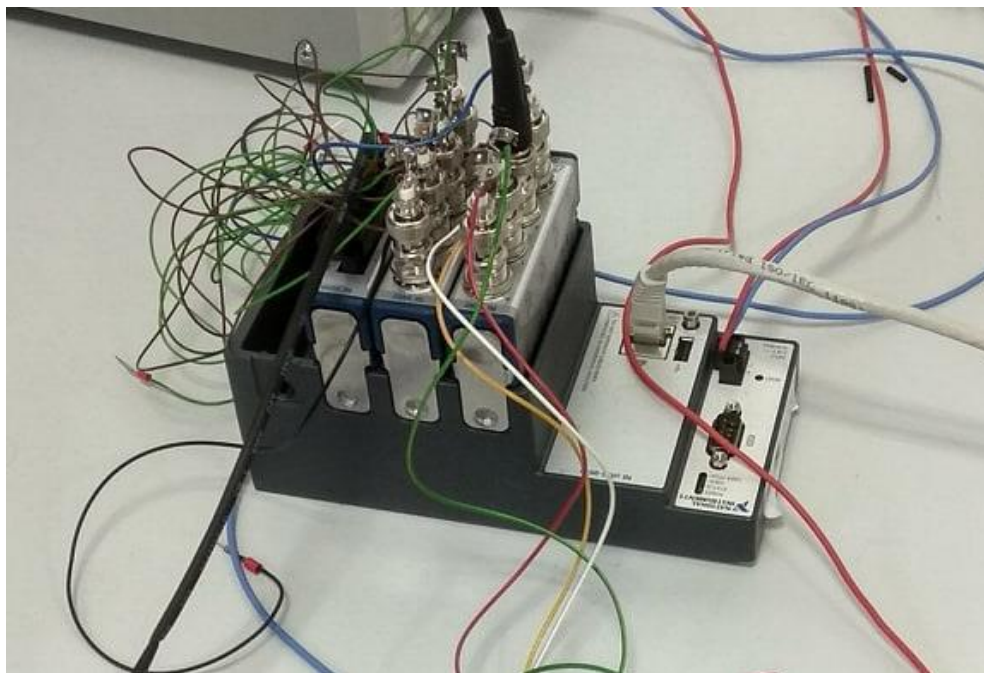
Obr. 3.2 Labview - Blokový diagram

Blokový diagram slouží pro funkční naprogramování aplikace. Vykonávání programu formou datového toku vyžaduje, aby před začátkem funkce jednotlivých bloků měly všechny jejich vstupy potřebná data. Pokud tato podmínka není splněna, program dále nepokračuje a čeká, dokud blok nemá k dispozici všechna vstupní data. Následně získaná data zpracuje podle své funkce a přes výstupy posílá výsledky dalšímu bloku. Kvůli snadné přehlednosti kódu jsou použity podprogramy, tzv. subVI, která sdružují jednotlivé funkční bloky se všemi vstupy a výstupy (Connectors). Jednotlivá SubVI je možné do sebe vnořovat, což programátorovi umožňuje vyvinutí složitých aplikací v přehledné formě. [14][15]

Výsledný program je možné přeložit do tvaru, ze kterého ho lze spustit nezávisle na prostředí Labview.

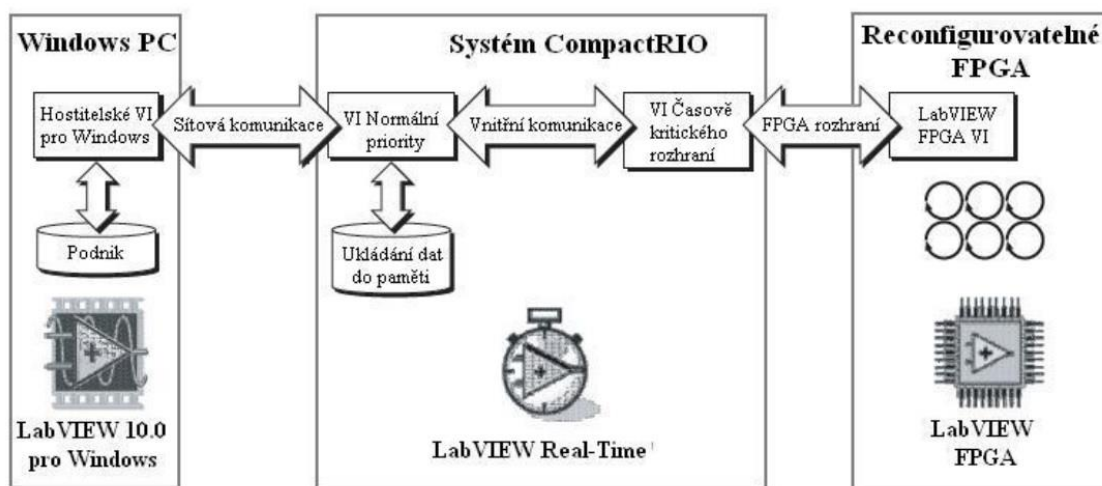
## 3.2 CompactRio

Zařízení CompactRIO je tvořeno kovovou konstrukcí, která se skládá z několika částí (dle typu chassis). Programovatelné hradlové pole (FPGA) je základem rekonfigurovatelných I/O (vstupně-výstupních) slotů, do kterých se připojují I/O moduly. Ty je možné vybírat z široké nabídky NI přesně podle potřeb pro danou úlohu. Nedílnou součástí zařízení je i procesor s modulem reálného času (Real-time řadič). Použité komponenty jsou na obr. 3.3. [17]



Obr. 3.3 CompactRio

K vytvoření aplikace využívající platformy CompactRio jsem využil propojení tří oddělených procesů. Pracovním nástrojem byl stolní počítač s vlastním operačním systémem Windows 7. Dále Real-Time řadič využívající vlastního Labview Real-Time operačního systému VxWorks verze 6.3. Kód v FPGA je přímo implementován do hradlové struktury, proto neobsahuje žádný operační systém.



Obr. 3.3 Architektura CompactRio [16][17]

### 3.2.1 FPGA

Programovatelná hradlová pole patří do skupiny programovatelných součástek neboli PLD (Programmable Logic Device) díky své struktuře poskytují nejširší

funkční možnosti. Tato struktura se vyznačuje pravidelným uspořádáním konfigurovatelných logických bloků. Pomocí nich je možné získat jednoduché sekvenční i kombinační funkce. Mohou obsahovat až desítky digitálních vstupů s několika výstupy. Vzájemná propojení těchto bloků pomocí programovatelných propojovacích matic umožňuje vytvářet složité komplexní funkce. [19][20]

### **3.2.2 Real-Time procesor**

Operační systém plní funkci základního softwaru. Nachází se přímo v paměti a ve stavu chodu je od zapnutí napájení až po jeho vypnutí. V průmyslovém využití je nutná včasná reakce (bez nutnosti čekání) systému, proto se využívá tzv. RTOS (Real Time Operating System) – operačního systému reálného času. Ten je schopen plnit požadavky v daném čase. [21]

Definice vystihující pojem RTOS vyslovená Donalem Gilliesem zní: „Real-time systém je takový, jehož správnost výpočtu nezáleží pouze na logické správnosti výpočtu, nýbrž záleží také na čase, ve kterém byl výsledek vypočten. Pokud časové podmínky systému nejsou dodrženy, říká se, že systém selhal“.

### **3.2.3 Použitá konfigurace přístrojů**

Pro vypracování práce byly použity následující přístroje:

Typ chassis – NI CompactRio-9076

- FPGA Xilinx Spartan-6 LX 45
- 4 sloty pro vstupní/výstupní moduly
- 400 MHz PowerPC real-time procesor
- Napájení 9-30V
- Dva Ethernetové porty - 10Base-T a 100Base-TX Ethernet
- Vysokorychlostní USB port 2.0
- RS-232 sériový port pro připojení periférií
- Nevolatilní paměť – 512 MB, DRAM paměť – 256 MB

I/O modul – NI9402

- 4-kanálový vstupně/výstupní digitální modul
- Individuální nastavitelnost kanálů směru komunikace
- Připojení BNC konektorem
- Izolace 1000 Vrms mezi jednotlivými kanály
- Maximální pracovní vstupní napětí 5,25V

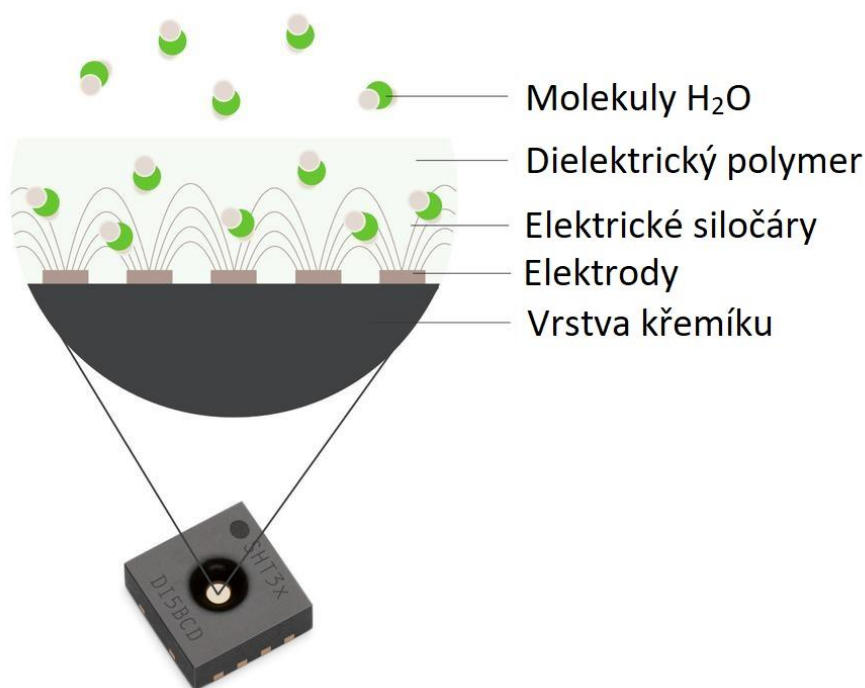
## 4 SNÍMAČE TEPLOTY A VLHKOSTI

Vzhledem k dostupnosti byly při úvodním testování komunikace a při prvotním srovnávání použity senzory firem Sensor Solutions – TE Connectivity – konkrétně HTU21D a následně senzory Sensirion SHT 10, SHT 30 a SHT 85.

Výše zmíněné senzory jsem vybral s ohledem na to, aby splňovaly následující požadavky: V první řadě se jednalo o přesnosti měření teploty a vlhkosti, dále o rychlost měřících konstant a také musely podporovat komunikaci po sběrnici I2C, která byla určena pro zpracování této úlohy.

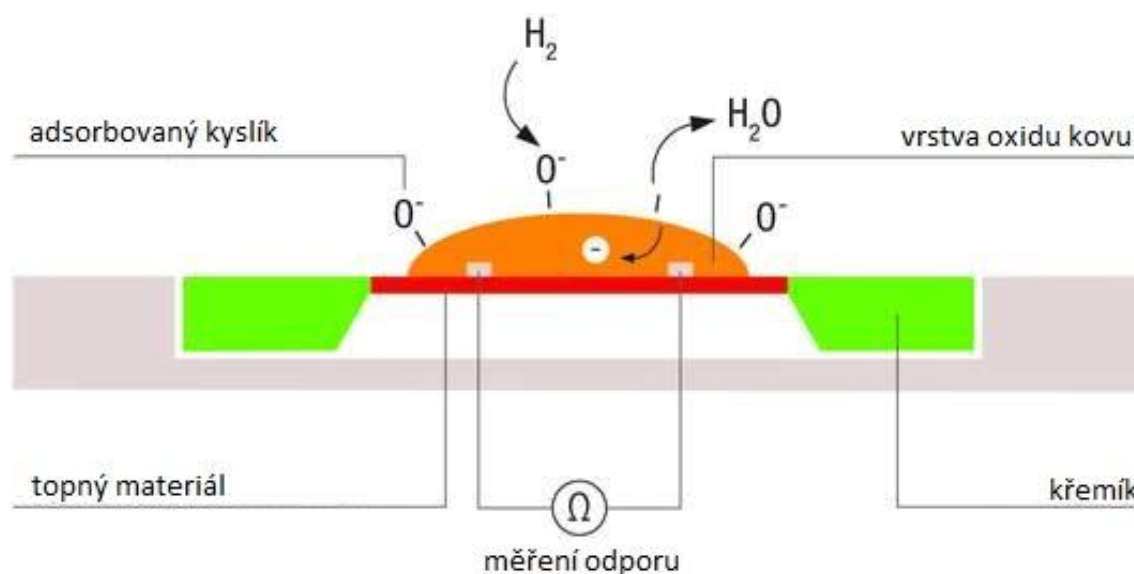
### 4.1 Měření teploty a vlhkosti

Všechny testované snímače pracují na stejném principu měření relativní vlhkosti (obr. 4.1). Měřená veličina závisí na kapacitě mezi elektrodami. Elektrody se nachází v dielektrické polymerní vrstvě, která obsahuje póry. Tato vrstva tvoří membránu, která odděluje křemíkovou část senzoru od okolního prostředí. Membránou prostupují molekuly vody obsažené ve vzduchu, a tím ovlivňují kapacitu měřenou na elektrodách. Změna kapacity je dále vyhodnocována elektrickým obvodem. Výstupem je binární signál, který obsahuje informaci o relativní vlhkosti. [5]



Obr. 4.1 Měření relativní vlhkosti [5]

Základem principu měření teploty testovaných snímačů je převod z měření odporu (obr. 4.2). Mezi dvěma elektrodami se nachází tenká vrstva částic oxidu kovu, která pokrývá povrch topného materiálu. Zahříváním oxidů kovu na vysoké teploty jsou ze vzduchu materiálem adsorbovány záporně nabité částice kyslíku uvolněné z molekuly vody. Takto vytvořená vrstva reaguje s okolními molekulami vody ve vzduchu, čímž dojde k uvolnění záporně nabitých částic kyslíku do oxidu kovu. Tento jev způsobí změnu odporu oxidu kovu a ta je pomocí elektrod měřena. Měřený odpor přímo závisí na koncentraci vody ve vzduchu prostředí, ve kterém je snímač umístěn. [6]



**Obr. 4.2 Měření teploty [6]**

Měření teploty a relativní vlhkosti současně, na jednom snímači, je velmi výhodné. Toto spojení umožní velmi přesné určení rosného bodu, důležitého pro správnost měření. Eliminuje se tak možná chyba spojená s teplotním gradientem, který vzniká mezi snímači vlhkosti a teploty. Technologie, která na jedno čipu spojuje čidla pro měření relativní vlhkosti a teploty na ploše pouhých několika čtverečných milimetrů spolu se signálovým zesilovačem, AC/DC převodníkem, kalibrovaným paměťovým úložištěm a digitálním výstupem, se nazývá CMOSens (obr. 4.3). [7]



Obr. 4.3 Konstrukce snímače relativní vlhkosti a teploty [7]

## 4.2 HTU21D

Pro prvotní testování komunikace po sběrnici I2C byl použit senzor relativní vlhkosti a teploty HTU21D, protože je u nás velmi snadno dostupný v kamenných obchodech. Je používán zejména ve spojení s arduinem [8] (otevřená elektronická platforma, založená na jednoduché počítačové desce a vývojovém prostředí). Dále slouží např. v tiskárnách či zvlhčovačích vzduchu.

Snímač HTU21D se objevil na trhu během roku 2017, tudíž velmi dobře splňuje nynější standardy v oblasti rozměrů i inteligence. Rozměry aktivní plochy senzoru jsou 3 x 3 x 0,9 mm. Certifikovaný výrobce zaručuje kalibraci a jednotlivé kusy sám testuje. Senzor na výstupu poskytuje linearizovaný digitální signál ve formátu I2C. [9]

Mezi důležité vlastnosti snímače patří nízké napájecí napětí (1,5 – 3,6V), poměrně rychlá časová odezva (5-10 s) a okamžitá desaturace po dlouhém čase saturační fáze. Ve standardních podmínkách lze snímač snadno vyměnit bez nutnosti jakékoli kalibrace. [9]

## 4.3 Sensirion

Firma Sensirion se zabývá výrobou velmi kvalitních mikrosnímačů a měřicích systémů (tlakových diferenčních, teplotních a vlhkostních, pro měření oxidu uhličitého nebo pro vyhodnocování kvality vzduchu). Dále nabízí komplexní řešení pro měření a ovládání vlhkosti a průtoku plynů a kapalin.



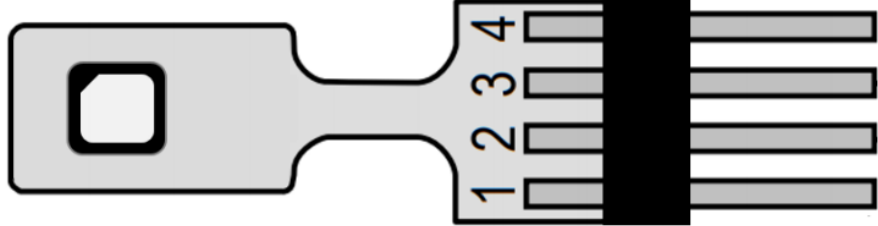
### 4.3.1 SHT10, SHT30

Pro testování byl nejprve k dispozici snímač SHT10. Poskytuje dvou sběrniceovou komunikaci po SDA a SCL. Nepodporuje však standardní I2C protokol, jelikož nemá vlastní adresu zařízení a nenabízí ani přesnější měření ve srovnání se snímačem HTU21D. V současnosti byla jeho distribuce ukončena a byl nahrazen sofistikovanějšími snímači. Jedním z takových nástupců je snímač SHT31. Oproti svému předchůdci disponuje vyšší přesností měření relativní vlhkosti i teploty.

### 4.3.2 SHT85

Snímač SHT85 měří dle popisu výrobce v porovnání se všemi dříve zmiňovanými snímači s největší přesností (viz tab. 4.3). Výrobce doporučuje senzor využívat v náležitých pracovních podmínkách. Konkrétně to je teplota 5-60°C a relativní vlhkost 20-80%. Dlouhodobé vystavení senzoru v nestandardních podmínkách může způsobit dočasný offset signálu měření relativní vlhkosti až o +3% po 60h v prostředí s relativní vlhkostí větší než 80%. Po navrácení senzoru do normálních podmínek dojde k navrácení do kalibrovaného stavu, nicméně nelze zamezit urychlenému opotřebení senzoru. Rozmístění jednotlivých pinů znázorňuje obr. 4.4. [10]

Pin	Název	Komentář
1	SCL	Serial clock; pouze vstup
2	VDD	Napájecí napětí; vstup
3	VSS	Ground
4	SDA	Serial data; vstup/výstup



Obr. 4.4 Rozmístění pinů na snímači SHT85 [10]

Adresa zařízení pro I2C komunikaci byla stanovena výrobcem na hodnotu 0x44H (= 01000100b). Každá přenosová sekvence začíná sekvencí START a je ukončena sekvencí STOP přesně dle standardu komunikace I2C. Vzhledem k tomu, že je třeba zabránit samozahřívání snímače, tak by neměl být v aktivním stavu více než 10% času. Snímač se proto dokáže přepnout do stavu „idle“ (čekání) vždy, když nevykonává měření nebo zrovna nekomunikuje. [10]

Zařízení poskytuje dvě možnosti pro měření a čtení. Měřicí režim „Single Shot Data Acquisition“ poskytuje jeden datový pár. Každý datový pár je tvořen 16-ti bity pro hodnotu teploty a dalšími 16-ti bity pro hodnotu relativní vlhkosti. Během přenosu je hodnota teploty i relativní vlhkosti následována CRC kontrolním součtem (mechanismus pro detekci nesrovnalosti posílaných dat). V tomto režimu jsou na výběr různé příkazy s rozdílnými nároky na spotřebu energie, resp. opakovatelnost měření (tab 4.1). [10]

**Tab. 4.1 Příkazy pro snímač v Single Shot režimu [10]**

Podmínka opakovatelnosti	Hex. Příkaz	
	MSB	LSB
Vysoká	0x24	00
Střední		0B
Nízká		16

Druhý měřicí režim je určen pro opakovaná měření s velmi vysokou frekvencí (0,5 – 10 měření za sekundu). Opět je zde možnost vybrat z několika příkazů lišících se opakovatelností a frekvencí získávat data (tab. 4.2). [10]

**Tab. 4.2 Příkazy pro snímač v režimu periodického čtení [10]**

Podmínka		Hex. Příkaz	
opakovatelnost	mps	MSB	LSB
Vysoká	0,5	0x20	32
Střední			24
Nízká			2F
Vysoká	1	0x21	30
Střední			26
Nízká			2D
Vysoká	2	0x22	36
Střední			20
Nízká			2B
Vysoká	4	0x23	34
Střední			22
Nízká			29
Vysoká	10	0x27	37
Střední			21
Nízká			2A

Dále výrobce senzoru umožnil přijímat sadu příkazů:

- příkaz ART pro zrychlení odezvy snímače
- příkaz BREAK určený pro zastavení periodického měření
- příkaz SOFT RESET pro uvedení snímače do úvodního kalibrovaného stavu
- příkaz pro zapnutí vnitřního topného tělíska pro kontrolu hodnot (v defaultním stavu je v nečinnosti)
- příkaz pro čtení/vymazání STATUS REGISTRu, který obsahuje řadu informací a stavu snímače

Jak již bylo zmíněno dříve, tak výstupní hodnoty měřené teploty a relativní vlhkosti jsou vysílány ve formátu 16-ti bitových hodnot. Obě hodnoty mají linearizovaný, plně kompenzovaný výstup z hlediska napájecího napětí a rozdílných působících teplot  $S_{RH}$  [10]

- Rovnice pro přepočet relativní vlhkosti RH do jednotek % z 16-ti bitové reprezentace  $S_{RH}$

$$RH = 100 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16}-1} \quad (4.1)$$

- Rovnice pro přepočet teploty T do jednotek °C z 16-ti bitové reprezentace  $S_T$

$$T = -45 + 175 \cdot \frac{S_T}{2^{16}-1} \quad (4.2)$$

## 4.4 Porovnání snímačů

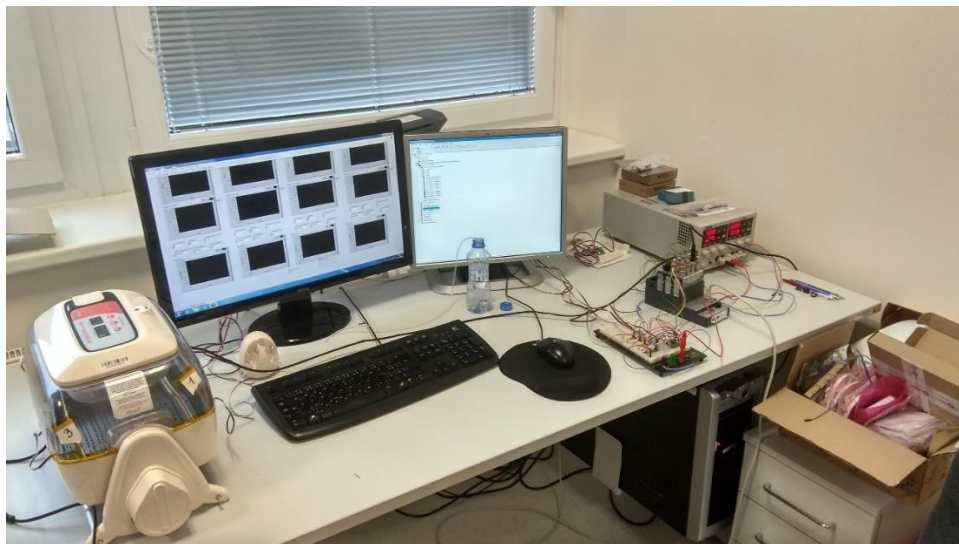
Pro porovnání všech uvažovaných snímačů je zde přiložena tabulka shrnující důležité parametry měření.

Tab. 4.3 Vlastnosti I2C snímačů relativní vlhkosti a teploty [9][10][11][12]

PARAMETR	SNÍMAČ	RH [%]	T [°C]
Rozlišení	HTU21D	0,04	0,01
Přesnost		±2	±0,3
Rozlišení	SHT10	0,05	0,01
Přesnost		±4,5	±0,5
Rozlišení	SHT31	0,01	0,015
Přesnost		±2	±0,3
Rozlišení	SHT85	0,01	0,01
Přesnost		±1,5	±0,1

## 5 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ

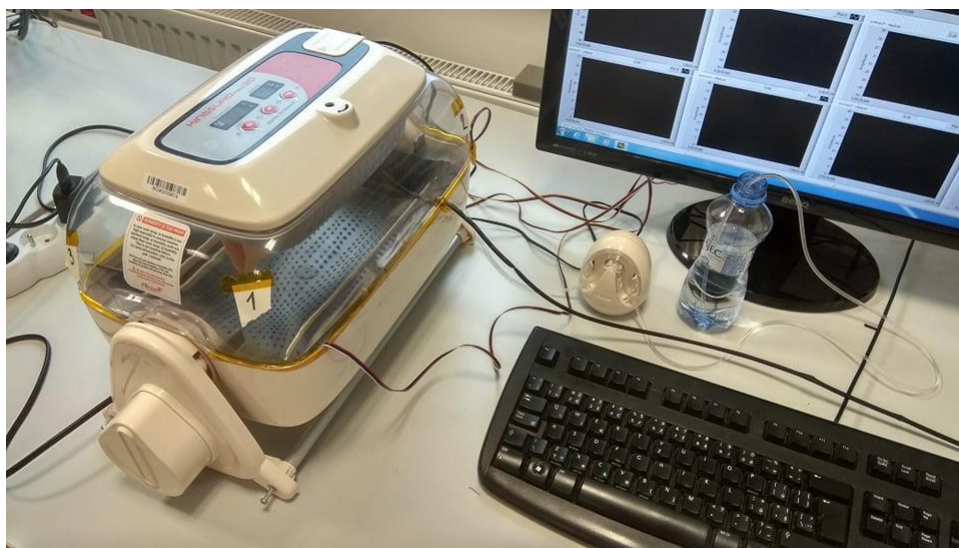
Níže uvedená fotografie obr. 5.1 zobrazuje pracoviště, na kterém byla praktická část práce vypracovávána. Jedná se o prostory VUT FEKT.



Obr. 5.1 Pracoviště

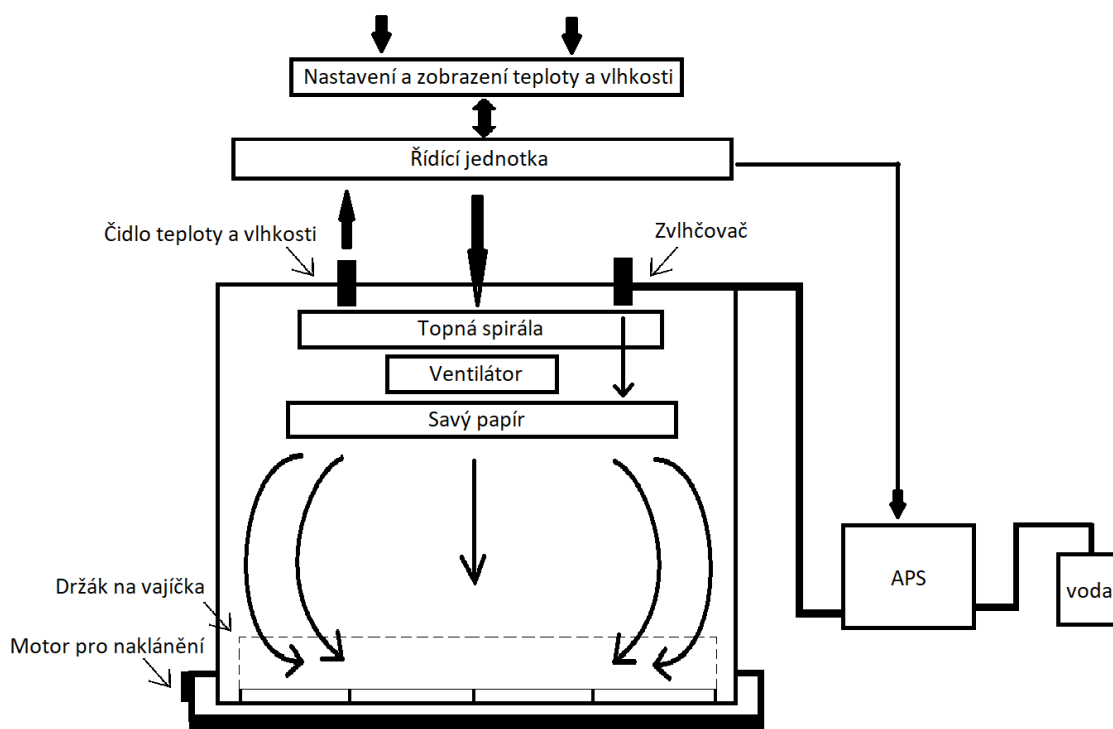
### 5.1 Popis klimatické komory

Pro práci byla použita klimatická komora Rcom King Suro Max-20, automatický inkubátor na vajíčka (obr. 5.2). Inkubační líheň je vybavena řízením teploty a vlhkosti, o kterém ovšem výrobce nijak blíže neinformuje. Uživatel má možnost nastavit požadovanou teplotu a vlhkost na vrchní straně líhně pomocí tlačítek a displeje.



Obr. 5.2 Klimatická komora - líheň

Pracovní schéma líhně je na obr. 5.3. Vzduch je ohříván pomocí topné spirály. Zvlhčování vzduchu zajišťuje automatické čerpadlo (APS – Automatic pumping system). Nucená cirkulace vzduchu je zajištěna ventilátorem. Čerstvý vzduch je přiváděn otvorem ve víku, který lze manuálně uzavřít. Líheň je vychylována z vodorovné polohy pomocí stojanu a motoru pro naklánění komory.



Obr. 5.3 Pracovní schéma líhně

## 5.2 Navazování komunikace

National Instruments k vývojovému prostředí Labview pro urychlení práce programátora nabízí mnoho ukázkových programů. Jedním z nich je FPGA program obsahující I2C komunikaci pro konkrétní I/O. FPGA program je nejprve implementován do hradlové struktury a následně ovládán z Real-Time modulu Labview. Pro svou práci jsem ho částečně využil.

### 5.2.1 Práce s jedním snímačem

Při testování komunikace I2C mezi senzorem SHT31 a zařízením CompactRio nastal nečekaný problém. Před zahájením komunikace byly drženy obě linky na vysoké napěťové úrovni. Jakmile byl spuštěn Real-Time program v Labview (konfigurace snímače, odeslání požadavku, přijetí hodnoty), tak byla vyvolána sekvence start. Napěťová úroveň linky SDA ovšem nedosáhla dostatečně nízké napěťové úrovně

(min.  $0,3V_{DD}$ ). Stejný problém nastal i při odesílání adresy snímače. V rámci ACK/NACK bitu na sběrnici SDA byla tedy vyslána log. 1, která dala najevo že žádné zařízení na sběrnici nepotvrdilo příjem neboli žádné zařízení s adresou 111 1111 se na sběrnici nevyskytuje. Daný problém jsem řešil změnami pull-up rezistorů v obvodu, zapojením sériových rezistorů na sběrnice SDA a SCL a snížením napájecího napětí snímače. Výsledná napěťová úroveň linky SDA byla stále stejná. Nedostatečné snížení napěťové úrovně mohlo být způsobeno přechodným trvalým poškozením při nesprávné manipulaci.



Obr. 5.4 Demonstrace nedostatečně nízké napěťové úrovně linky SDA

Pro práci jsem dále využil snímače SHT 85. Tento snímač nejlépe splňoval všechny požadavky na přesnost, rychlost časové konstanty a rozlišení. Komunikaci s ním jsem již bez potíží navázal a dále pracoval pouze se snímači tohoto typu.

### 5.2.2 Práce s více snímači

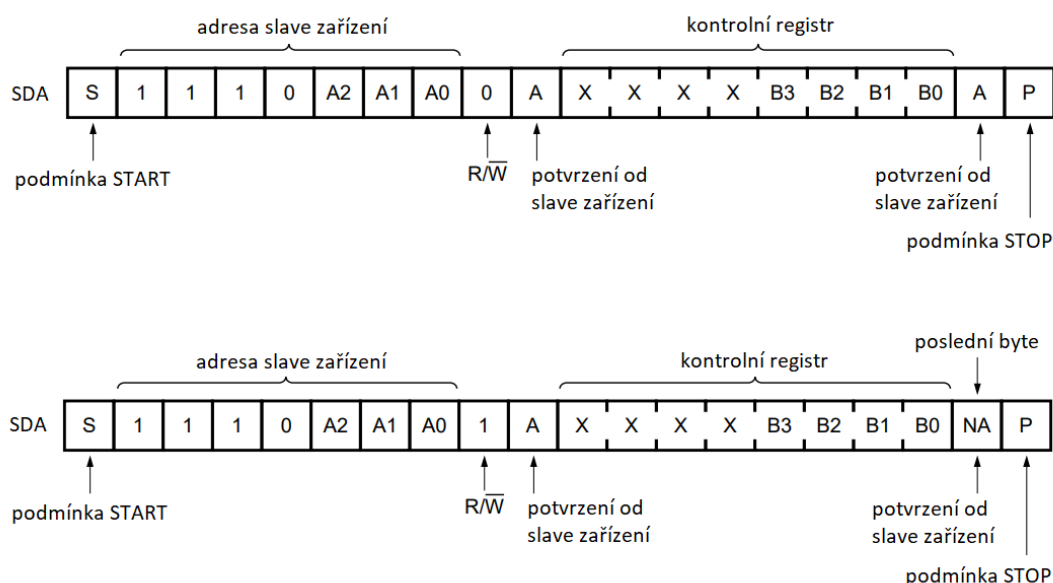
Dalším důležitým krokem bylo vytvoření programové struktury, která by umožnila komunikaci s dalšími třemi snímači. Struktura snímačů SHT85 nedovoluje změnit předem výrobcem definovanou adresu zařízení. Kdybych tedy na stejnou sběrnici připojil všechny snímače se stejnou adresou, nebyla by komunikace možná.

Prvním zamýšleným a částečně realizovaným řešením bylo rozšíření CompactRia o další I/O moduly. Pro každý snímač byl vytvořen separátní komunikační kanál a problém s duplikací adresy snímačů byl eliminován. Za předpokladu využití exemplu s komunikací bylo třeba implikovat do hradlové struktury FPGA čtyři programy, každý pro separátní komunikační kanál. Tento



způsob řešení byl sám o sobě úspěšný. Nutnost nepřetržitého měření akčního zásahu topné spirály ovšem toto řešení znemožnila. Časové prodlevy mezi otevíráním a zavíráním referencí na jednotlivé programy uložené v FPGA byly větší než rychlost změny akčního zásahu topné spirály.

Jedním z možných řešení problému, bylo použití analogového multiplexeru - PCA9547. Tato elektronická součástka umožňuje větvení komunikace až na osm kanálů (SDA/SCL pár). Multiplexer se řídí stejnými komunikačními pravidly jako ostatní zařízení na sběrnici. Nejprve musí master odeslat adresu multiplexeru, kterou lze hardwarově měnit připojením adresovacích vstupů A0, A1 a A2 ke společné zemi (bit. 0) nebo napájecímu napětí (bit. 1). Následuje datová zpráva s informací pro control register, který kanál má být pro komunikaci povolen (enable). V tomto momentě probíhá komunikace mastera s jedním snímačem, který je připojen k danému kanálu. Po obdržení zprávy pro povolení dalšího kanálu multiplexer nejprve uzavře předchozí povolený kanál a až následně otevře jiný. Multiplexer tak zajišťuje, že v jednom okamžiku může být ve stavu enable pouze jeden kanál. Průběh R/W (čtení/zápis) komunikací znázorňuje níže uvedený obrázek 5.5.

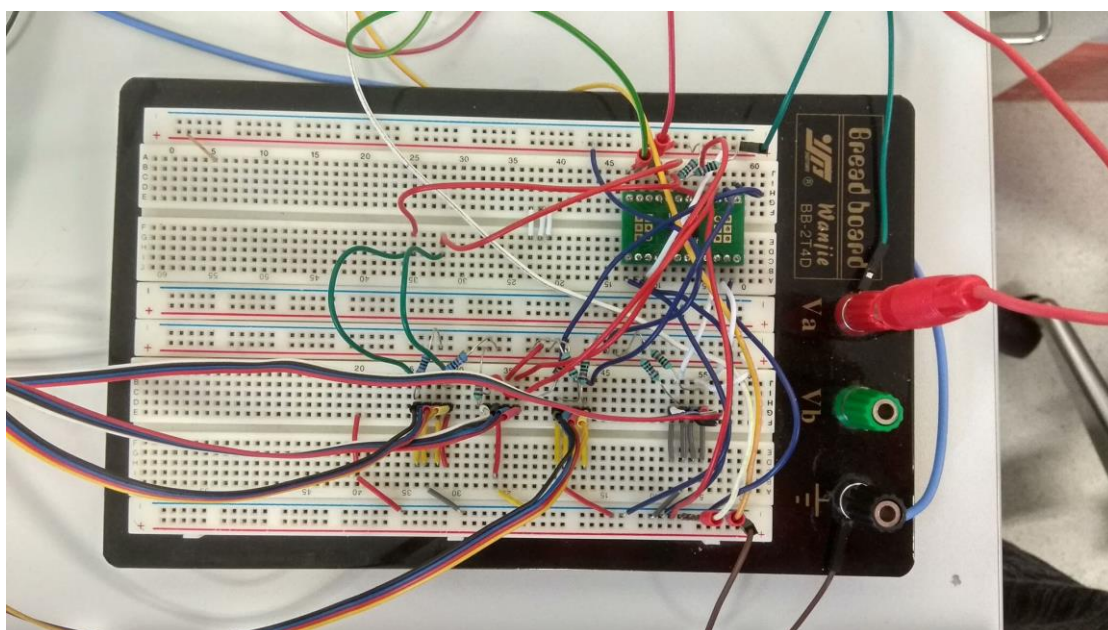


Obr. 5.5 Komunikace s multiplexerem PCA9547 [18]

### 5.3 Zapojení úlohy

Pro jednoduché testování zapojení jednotlivých elektronických prvků jsem využil výhod nepájivého kontaktního pole. Snímače umístěné v líhni jsem pomocí vodičů zakončených vhodnými konektory připojil do zdírek pole. Toto řešení mi umožnilo jednotlivé snímače velmi snadno vyměňovat a doplňovat další. Konečné

elektronické zapojení úlohy obsahující čtyři snímače, multiplexor a pull-up rezistory ilustruje obr. 5.6.



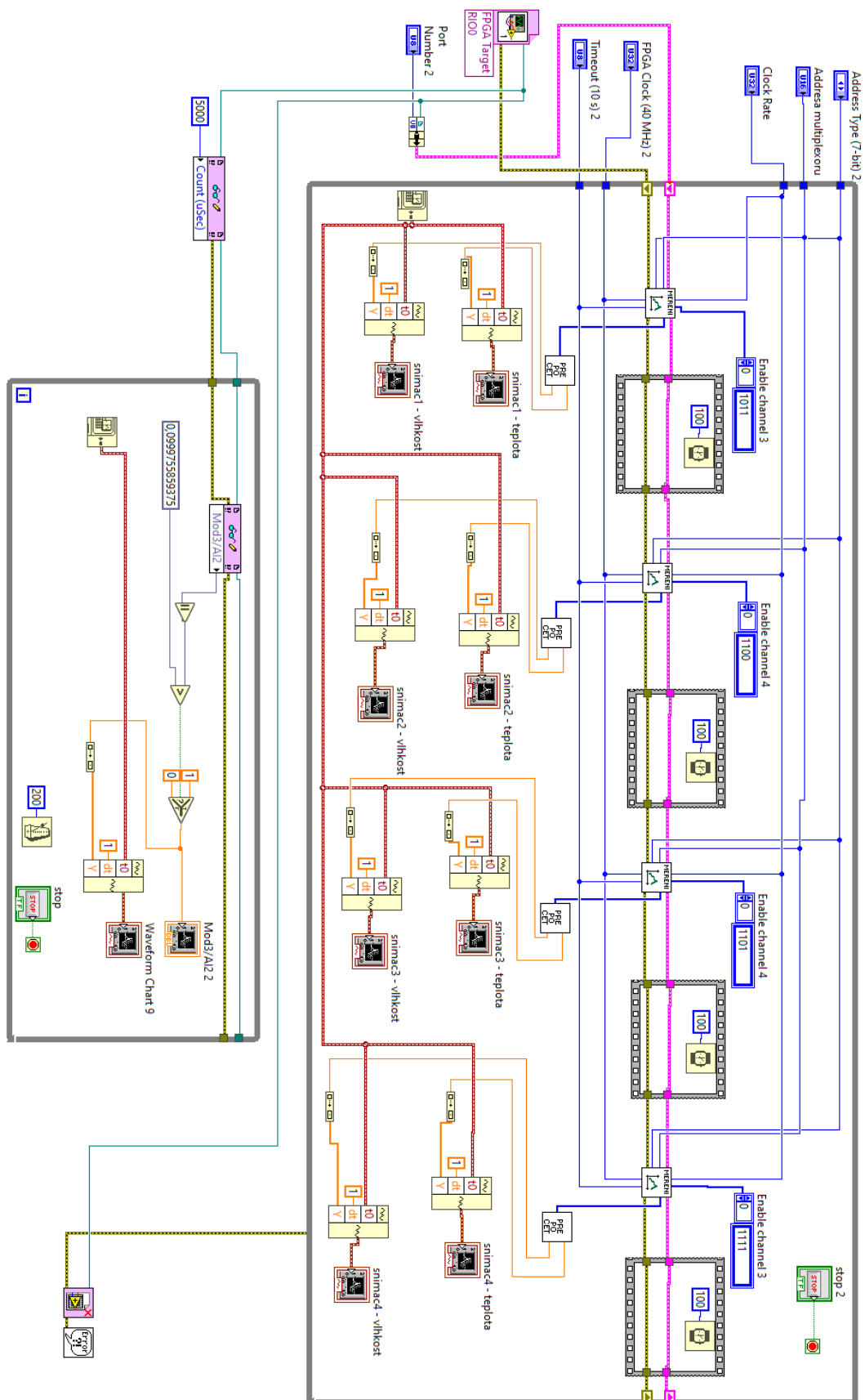
Obr. 5.6 Elektronické zapojení úlohy na kontaktním nepájivém poli

## 5.4 Práce v Labview

Pro programování jsem použil grafický editor Labview. Již dříve zmiňovaný komunikační exemple FPGA program se strukturou I2C komunikace jsem doplnil o vyčítání napětí akčního zásahu topné spirály a pomocí Labview jsem ho nahrál do hradlové struktury FPGA. Blokový diagram i čelní panel si lze prohlédnout v příloze 1 a 2.

Volání FPGA programu jsem řídil pomocí druhého programu prostřednictvím Real-Time modulu. Kód je tvořen dvěma smyčkami while. První je určena pro práci se snímači. Obsahuje obsluhu FPGA zařízení, subVI pro měření teploty a vlhkosti, subVI pro přepoččet změřených hodnot a grafické zobrazení. Druhý cyklus while slouží k záznamu zásahu topné spirály. Obsahuje obsluhu FPGA zařízení, měření zásahu a grafické zobrazení. Níže je přiložen obr. 5.7, který reprezentuje celý blokový diagram programu. Čelní panel je obsažen v příloze 3 a blokové schéma subVI pro měření lze nalézt v příloze 4.





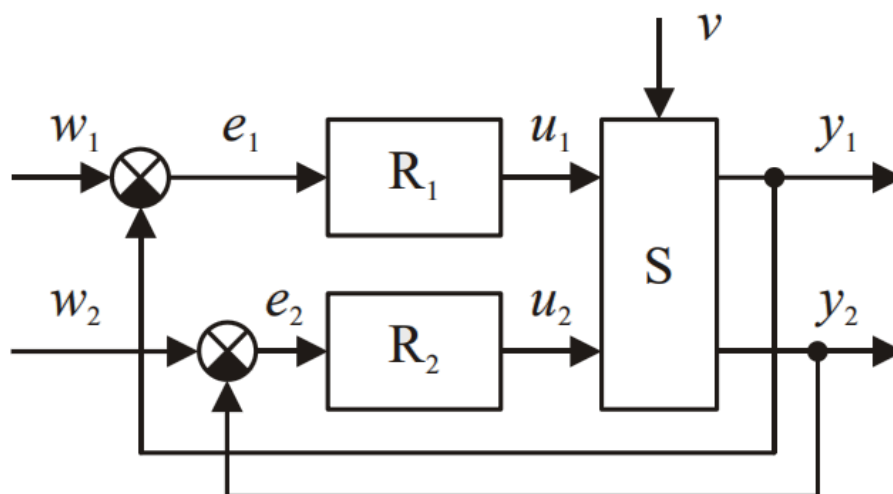
Obr. 5.7 Blokový diagram Real-Time programu

## 6 MATEMATICKÝ MODEL SOUSTAVY

Matematický model je tzv. abstraktní model, který pomocí matematického aparátu popisuje reálnou soustavu. V závislosti na účelu sestavení matematického modelu je sestavován s žádoucí přesností, která je úzce spojena se složitostí popisu soustavy. Velmi přesné matematické modely mohou vyžadovat složitý matematický aparát. Takové modely nejsou příliš vhodné pro testování chování soustavy. Pro optimalizaci soustavy, predikci chování dané soustavy v závislosti vstupních veličin a podobně jsou vhodné zjednodušené, ovšem stále kvalitní modely, které umožní testování soustavy rychleji, levněji a efektivněji v porovnání s testováním na reálné soustavě. Zjednodušeně lze tvrdit, že úkolem modelu je co nejpresnější predikování nebo reprodukování chování systému. [23]

### 6.1 Popis regulačního obvodu

Regulační obvod se skládá ze soustavy zkoumané líhně, regulátoru teploty, regulátoru vlhkosti a dvou zpětných vazeb. Vstupy regulačního obvodu jsou: akční zásah topné spirály a zvlhčování vzduchu pomocí pumpování vody čerpadlem. Výstupy regulačního obvodu jsou regulovaná teplota a vlhkost v komoře, které se navzájem ovlivňují. Schéma je na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Schéma regulačního obvodu [13]

### 6.2 Identifikace soustavy

Identifikování neboli rozpoznávání je používáno v mnoha oblastech lidského života. Pro řešení této práce je klíčová tzv. systémová identifikace systému, která má za úkol nalézt co nejpresnější strukturu a parametry zkoumaného systému ovlivňující

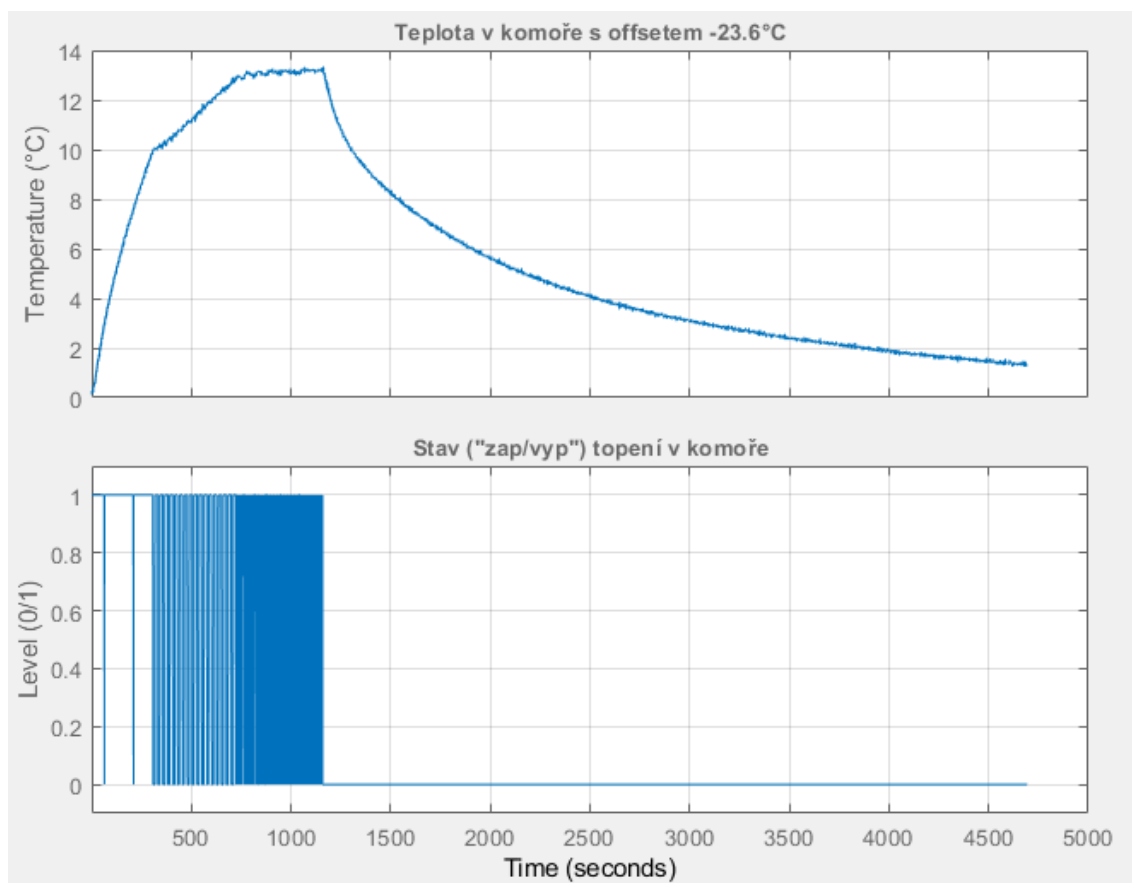
funkční závislosti mezi vstupy a výstupy. Při nesprávné nebo nepřesné identifikaci, není možné vytvořit kvalitní matematický model soustavy.

Jak jsem zmiňoval v úvodu, cílem práce je sestavení matematického modelu celé soustavy. Vzhledem k neznámému řízení, jsem pro řešení této práce zvolil experimentální způsob identifikace soustavy. Ta spočívá v rozdílném působení vstupních veličin soustavy a následném zaznamenávání a porovnávání jeho výstupních signálů. Pro správnou identifikaci je nezbytné znát statické i dynamické vlastnosti systému, které lze právě získat prováděním daných experimentů na soustavě.

Pro identifikaci soustavy na základě vhodně zvolené struktury a současně získání matematického modelu jsem využil nadstavby v programu Matlab, modulu System Identification Toolbox.

### **6.3 Experimentální měření**

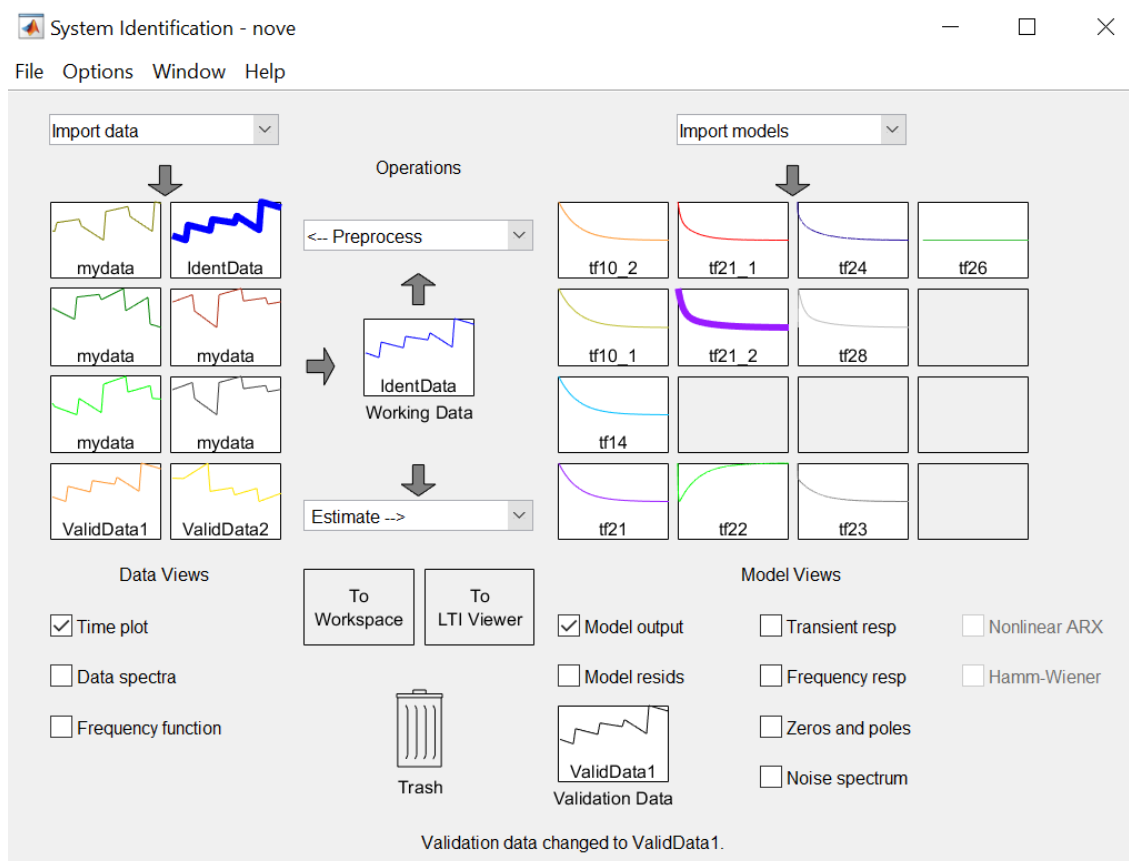
Pro identifikaci chování líhně jsem provedl následující měření. Regulátoru jsem nastavil žádanou teplotu  $37,5^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkost 48% (ideální podmínky pro líhnutí vajec). Po dosažení žádané teploty jsem topení vypnul a měřil postupné ochlazování komory. Naměřená sada dat obsahovala hodnoty akčního zásahu topné spirály, výstupní teploty a relativní vlhkosti v líhni v rozích u dna komory. Jelikož jsem nezaznamenával akční zásah vlhčení vzduchu, tak jsem výstupní hodnoty vlhkosti nebral do úvahy při identifikaci. Měření probíhalo v prostředí laboratoře s teplotou  $23,6^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkostí 29%. Naměřené teploty ze všech 4 použitých snímačů jsem zprůměroval a provedl u nich offset  $23,6^{\circ}\text{C}$ . Takto upravená data si lze prohlédnout na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Měření identifikační sady dat

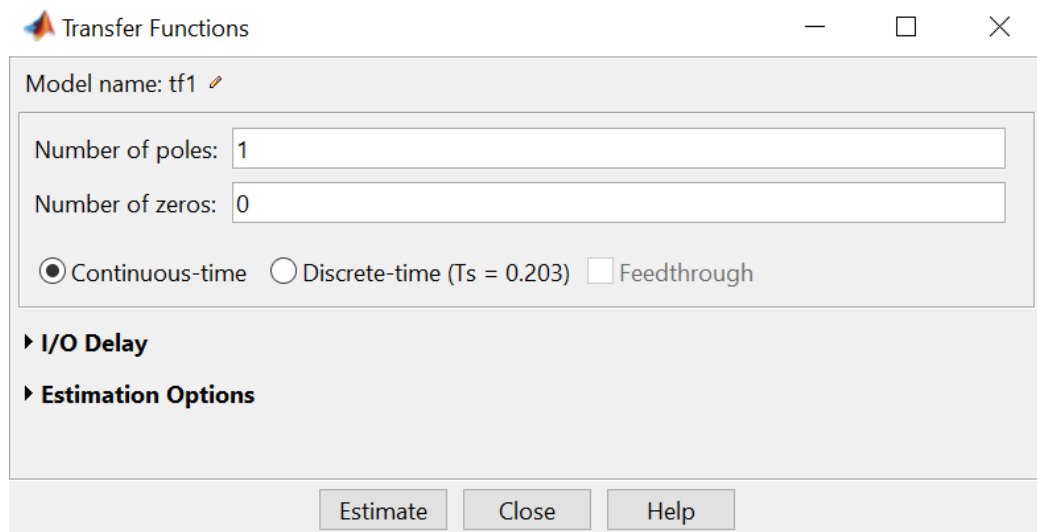
## 6.4 Identifikace v Matlabu

Ventilátor zajišťuje homogenní šíření vzduchu v komoře tak, aby ve všech místech u dna komory byly stejné podmínky pro líhnutí vajec. Naměřené teploty z jednotlivých snímačů jsem zavedl do workspace Matlabu a vytvořil pro ně skript, který vypočítal průměrné hodnoty. Následně jsem do workspace zavedl i naměřená data akčního zásahu topné spirály. Jelikož byly teploty a akční zásah měřen s rozdílnou frekvencí, bylo nutné teploty převzorkovat. Tento proces jsem aplikoval pro naměřená výpočetní i validační data. Dále jsem provedl offset teplot výpočetních i validačních  $-23.6^{\circ}\text{C}$  a vhodně zvolil identifikační intervaly. Pro všechny výše zmíněné operace jsem vytvořil skript v Matlabu (.m).



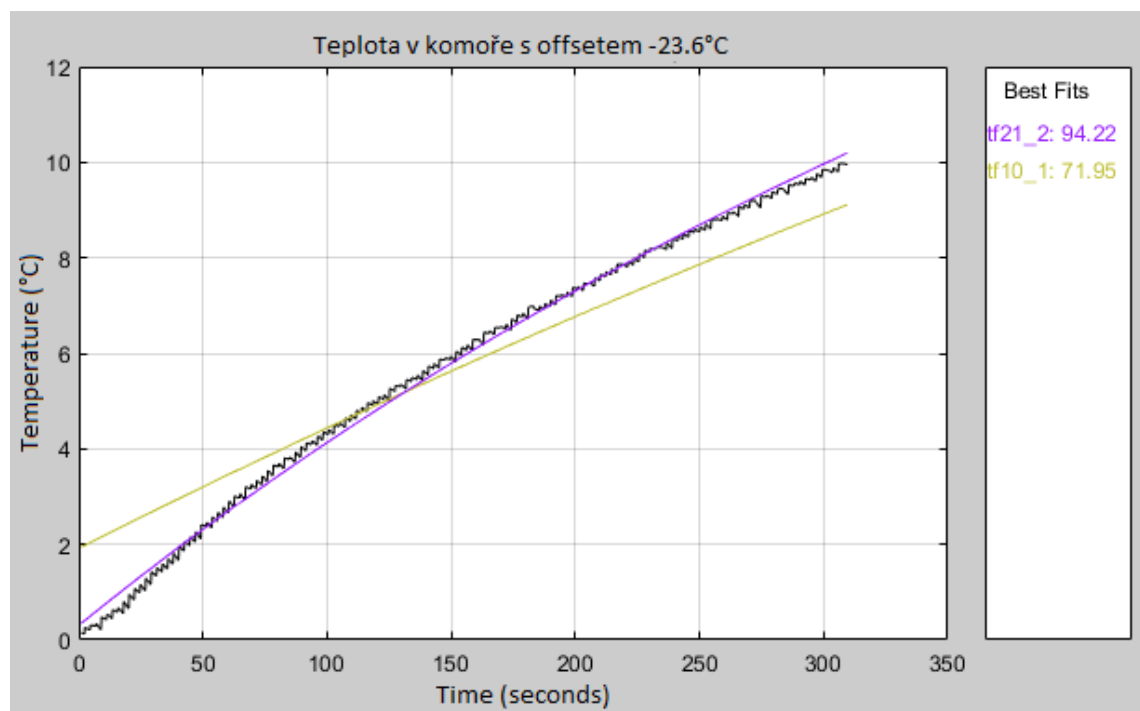
**Obr. 6.3 System Identification Toolbox**

Následně jsem mohl přejít k samotné identifikaci v Matlabu. Příkazem `ident` napsaného do Command Window jsem vyvolal System Identification Toolbox (obr. 6.3). Upravená data jsem naimportoval do pracovního prostoru Data Views. Identifikační sadu dat `IdentData`, která byla určena k výpočtu jsem vložil do prostoru Working Data a v rozbalovacím okně vybral možnost Transfer Function Models. Následným zadáváním řádu přenosové soustavy (počtu pólů a nul) a kliknutím na tlačítko Estimate jsem Matlabu vydal příkaz pro sestavení modelu (obr. 6.4).

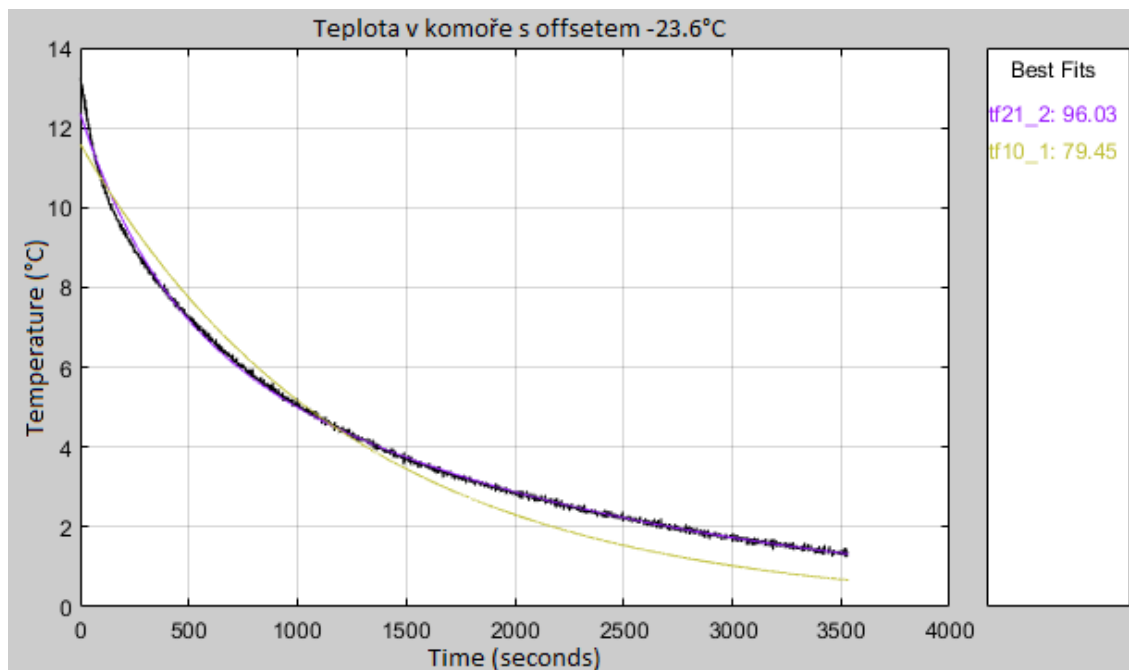


Obr. 6.4 Transfer Function Models

Nejlepší výsledky dávala přenosová funkce prvního a druhého řádu. Jako validační data jsem použil vybrané intervaly dříve naměřených dat, při kterých bylo vyřazeno řízení. Byly to odezvy systému při zapnutém topení – oteplování (ValidData1) a při vypnutém topení – ochlazování (ValidData2). Funkce druhého řádu byla z hlediska popisu soustavy líhně nejlepší i v porovnání s validačními intervaly. Měřitko shody reálných dat a modelu v toolboxu – Estimation Fit vrátil hodnoty 94,22% (ohřívání), 96,03% (samovolné ochlazování). Funkce prvního řádu se ukázala jako nedostatečně přesná. Výsledky si lze prohlédnout v následujících obr. 6.5 a 6.6.



Obr. 6.5 Validační data 1 – ohřívání



Obr. 6.6 Validační data 2 – samovolné ochlazování

## 6.5 Výsledný matematický model

System Identification Toolbox poskytuje matematický model ve formě přenosu systému. Identifikací jsme získali nejlepší model jako přenosovou funkci systému se dvěma póly a jednou nulou ve tvaru:

$$G(s) = \frac{0,04408 \cdot s + 5,604 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0,003333 \cdot s + 1,42 \cdot 10^{-6}} \quad (6.1)$$

## 7 MODELOVÁNÍ V SIMSCAPU

Pro vypracovávání fyzikálního modelu jsem využil nadstavby Simulinku – Simscape Thermal. Pro vytvoření validního modelu jsem se zaměřil na fyzikální děje, které v soustavě při tepelné výměně probíhají. Následně jsem do modelu doplnil parametry a fyzikální konstanty pro danou soustavu.

### 7.1 Softwarové prostředí Simscape

Simulink, součást Matlabu, je prostředí pro tvorbu, simulaci a analýzu systémů. Základním rozhraním je grafický editor, ve kterém se vytváří modely ve formě blokových diagramů. Jednotlivé bloky lze vybírat z rozsáhlých knihoven, případně lze definovat vlastní. Pro vytváření systémů podle konkrétních fyzických prvků je Simulink rozšířen o Simscape. Ten obsahuje nástroje a základní stavební prvky pro modelování a simulaci fyzikálních systémů. Do simulačních schémat Simscape zavádí reálné fyzikální veličiny, jako jsou hmotnosti, hustoty, tepelné konstanty atd. Programovací bloky odpovídají reálným prvkům systému. Jejich spojováním do sítě dosáhneme přenosů energie v systému, které odpovídají přenosům v reálné soustavě. [25][26]

### 7.2 Tepelná výměna vedením

Přenos tepla vedením (= kondukcí) vždy probíhá směrem definovaným klesající teplotou. Částice látky v oblasti s vyšší teplotou, kmitající kolem svých rovnovážných poloh, mají větší střední energii ve srovnání s částicemi látky v oblasti s nižší teplotou. Střední energie částic je předávána částicím s nižší střední energií, které jsou v tělese vzájemně bezprostředně sousedící. Tímto způsobem se teplo může šířit v pevném, kapalném i plynném skupenství. Dominantní úlohu působí při šíření tepla v tělesech z pevných látek, za předpokladu rozdílné teploty v různých místech tělesa. Rychlost vedení tepla definuje tepelnou vodivost materiálů, které na základě této vlastnosti rozdělujeme na tepelné vodiče a izolanty. [27][28]

### 7.3 Tepelná výměna prouděním

Proudění (= konvekce) se projevuje pohybem tekutiny. Může se tedy vyskytovat pouze u látek v kapalném nebo plynném skupenství. Proudění se dělí podle způsobu vzniku na volné a nucené. Volné proudění může vzniknout v důsledku odlišných teplot v tekutině a úje vyvoláno tím, že se současně se změnou teploty tekutiny mění její hustota. Teplejší látka má menší hustotu a stoupá vzhůru, naopak chladnější látka má větší hustotu a klesá. Celý proces se neustále opakuje, dokud nedojde



k tepelnému vyrovnání. Nucené proudění je důsledkem zásahů vnějších sil, jejichž zdrojem může být například ventilátor nebo čerpadlo. [27][28]

## 7.4 Tepelná výměna zářením

Každý objekt, který je tvořen látkou libovolného skupenství a teploty (blíží se absolutní nule), je zdrojem elektromagnetického záření v důsledku fluktuací nabitých částic. Toto elektromagnetické záření představuje energii, která je z objektu vysílána. Vzhledem k tomu, že elektromagnetické záření ke svému šíření nepotřebuje látkové prostředí, je záření jediným typem přenosu tepla ve vakuu. Množství přenášené energie je určeno teplotou zdroje, vzdáleností zdroje od příjemce, barvou, typem a velikostí povrchu příjemce a dalšími faktory. [27][28]

## 7.5 Výpočet tepelných přenosů

Bloky jednotlivých přenosů v Simscapu představují skutečný tok energie ve zkoumané soustavě. Hodnoty tepelných toků jsou vypočítávány pomocí termomechanických zákonů.

Přenos tepla sáláním mezi dvěma tělesy je popsán Stefan-Boltzmannovým zákonem, který vyjadřuje následující rovnice:

$$Q = k \cdot A \cdot (T_A^4 - T_B^4) \quad (7.1)$$

$Q$  ... tepelný tok [W]

$k$  ... radiační koeficient [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ]

$A$  ... plocha vyzařujícího tělesa [ $\text{m}^2$ ]

$T_A, T_B$  ... teploty těles [K]

Radiační koeficient je určen řadou charakteristik obou interagujících těles: geometrickým tvarem, rozměrem a emisivitou povrchu. Přibližnou hodnotu lze vypočítat:

$$k = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (7.2)$$

$\sigma$  ... Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ]

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  ... emisivita povrchů obou těles [-]

Přenos tepla vedením mezi dvěma vrstvami jednoho materiálu je popsán Fourierovým zákonem, který vyjadřuje následující rovnice:

$$Q = k \cdot \frac{A}{D} \cdot (T_A - T_B) \quad (7.3)$$

- Q ... tepelný tok [W]  
 k ... součinitel tepelné vodivosti materiálu [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 A ... plocha kolmá ke směru toku tepla [ $\text{m}^2$ ]  
 D ... tloušťka tělesa [m]  
 $T_A, T_B$  ... teploty vrstev [K]

Přenos tepla prouděním mezi dvěma látkami při pohybu tekutin je popsán Newtonovým zákonem ochlazování, který vyjadřuje následující rovnice:

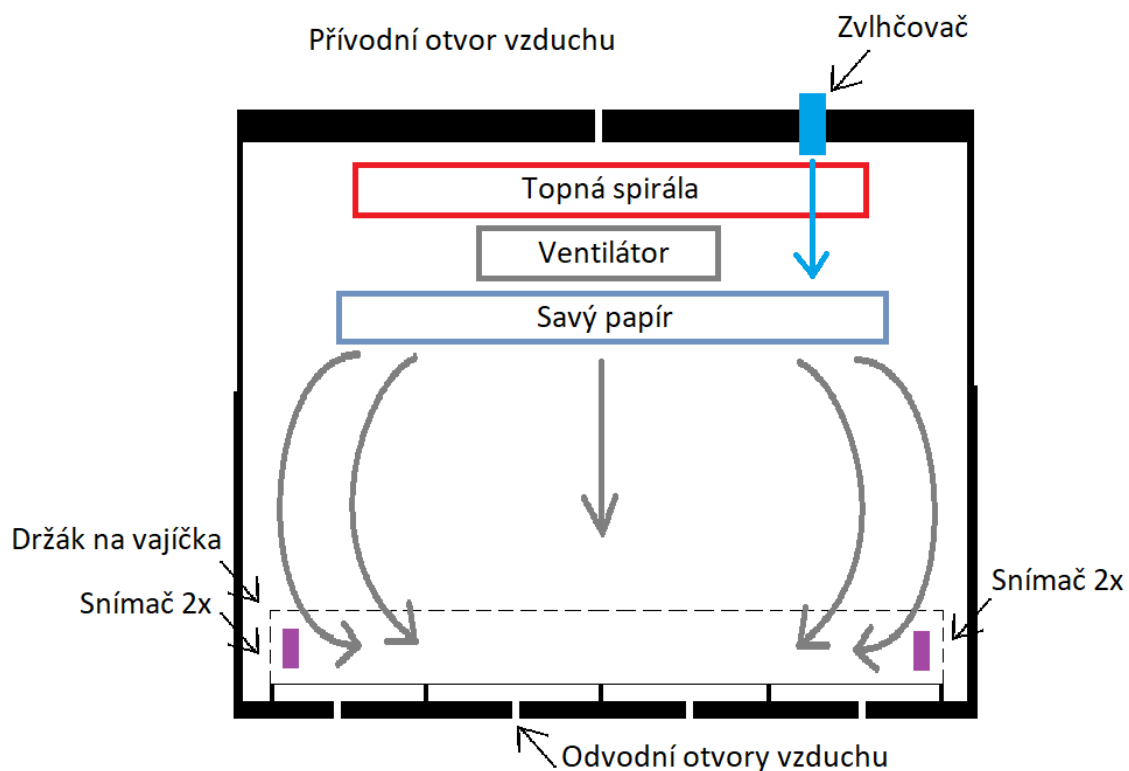
$$Q = k \cdot A \cdot (T_A - T_B) \quad (7.4)$$

- Q ... tepelný tok [W]  
 k ... součinitel přestupu tepla konvekcí [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 A ... plocha vyzařujícího tělesa [ $\text{m}^2$ ]  
 $T_A, T_B$  ... teploty těles [K]

## 7.6 Analýza tepelné výměny v líhni

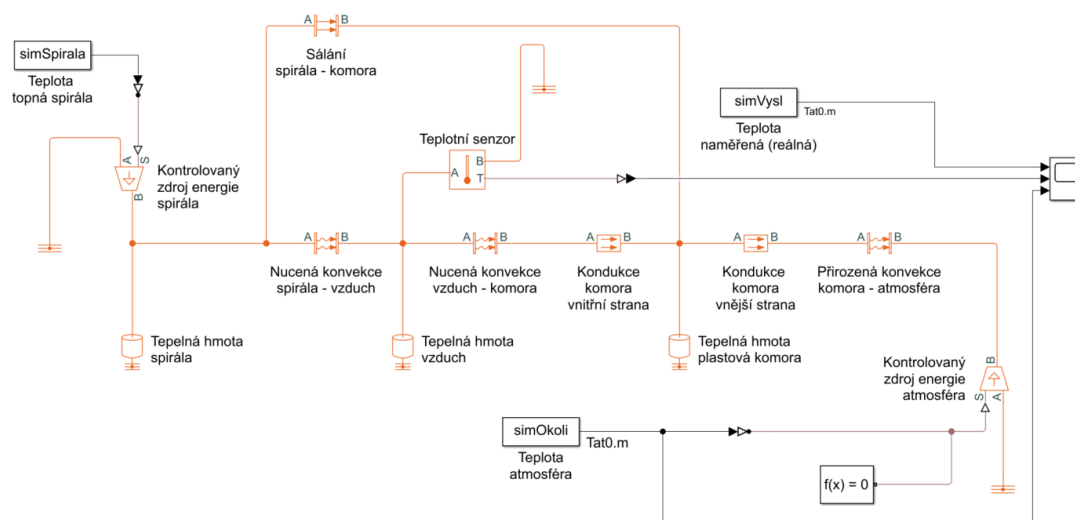
Vzduch uvnitř líhně je ohříván pomocí topné spirály, která je tvořena drátem z kovové slitiny, ovinuté kolem keramického jádra. Vinutí je zahříváno v důsledku proudění napětí zdroje střídavého proudu. Teplo je dále předáváno přes izolaci do pláště. Poslední vrstva topení je již v přímém kontaktu se vzduchem v líhni.

Na základě vizuálního zkoumání jsem odhadl, že je pravděpodobně tvořena silikonovou pryží. Bližší informace o přesném složení a konstrukci topení výrobce neudává. Teplo je přenášeno ze spirály do vzduchu konvekcí. Nad topnou spirálou je umístěn ventilátor, který zrychluje šíření tepla a zajišťuje velmi dominantní nucené proudění. Teplo je z topné spirály rovněž přenášeno radiací, při které je teplo předáváno stěnám komory, které ho dále předávají vzduchu. Další přechod tepla nastává mezi vzduchem a stěnami komory také konvekcí. Zde teplo prostupuje skrz plastové stěny – kondukce a dále uniká do okolního prostředí, kde dochází k tepelné výměně konvekcí. Zvenku na komoru současně působí vliv okolní atmosféry. Pro lepší představu líhně přikládám na obr. 7.1 její situační schéma.



Obr. 7.1 Situační schéma komory

Na obr. 7.2 je zachycen Simscape model, který reprezentuje zkoumanou klimatickou komoru. Výše popsané tepelné výměny odpovídají jednotlivým funkčním blokům konvekce, kondukce a radiace. Dále jsem využil bloků realizujících funkci zdroje energie, bloků modelujících ukládání vnitřní energie v tepelné síti a bloků, které představují teplotní senzor a teplotní referenci.

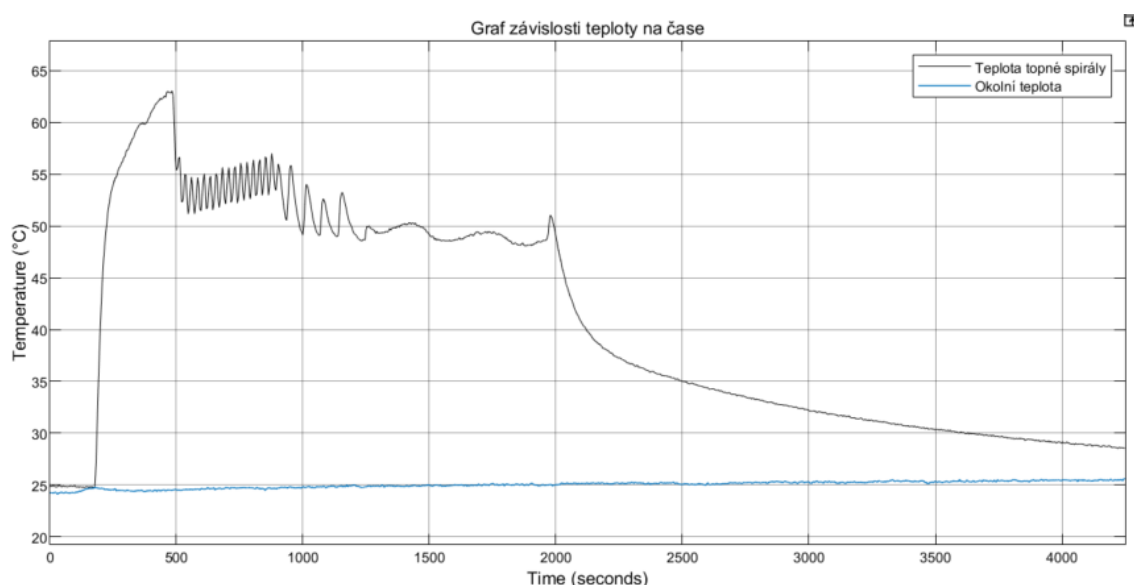


Obr. 7.2 Schéma fyzikálního modelu - Simscape

## 7.7 Parametry modelu – fyzikální veličiny

Většina bloků využitých v modelu vyžaduje nastavení hodnot fyzikálních veličin podle použitých materiálů, rozměrů a tepelných přestupů. Vzhledem k tomu, že jsem neměl možnost přesně zjistit úplně všechny parametry, vycházel jsem u některých při jejich určování z tabulkových přibližných hodnot.

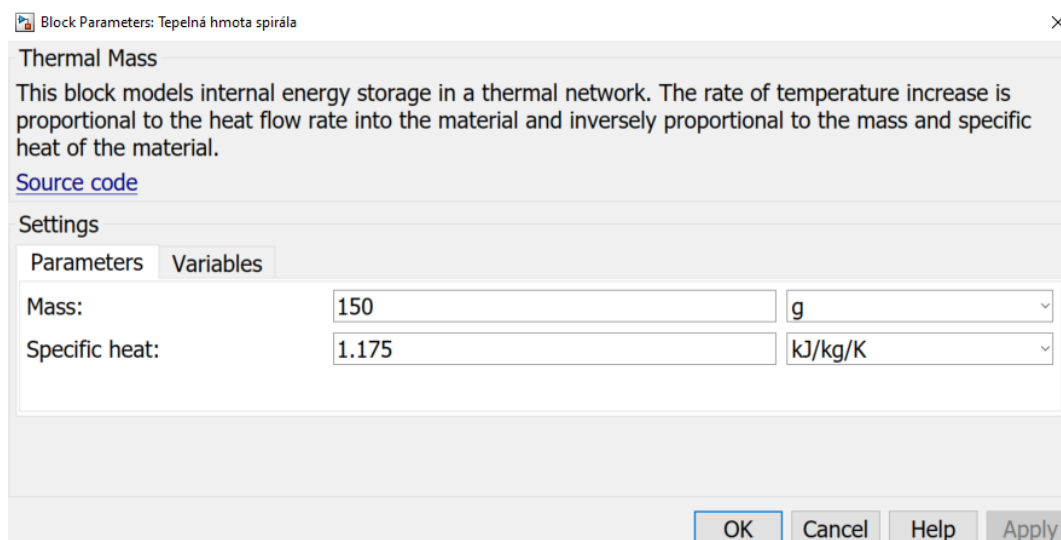
Základem pro model je naměřený průběh teploty topné spirály při jejím ohřívání a současně průběh teploty venkovního prostředí v laboratoři. Oba průběhy jsou v modelu na opačných koncích tepelné sítě propojeny přes konvertor hodnot do ideálních zdrojů energie. Naměřené průběhy hodnot si lze prohlédnout na obr. 7.3.



Obr. 7.3 Průběhy hodnot teplot pro vytvoření fyzikálního modelu

Bloky modelující princip ukládání vnitřní energie v tepelné síti pro správnou funkci vyžadují nastavení hmotnosti a měrné tepelné kapacity hmoty. Realizují funkci zajišťující zvýšení rychlosti teploty, která je přímo úměrná rychlosti toku tepla do materiálu a nepřímo úměrná hmotnosti a měrnému teplu materiálu.

Modelové schéma obsahuje tři bloky představující tepelnou hmotu. První z nich je topná spirála. Jelikož nejsem schopen určit její přesné složení a ani ji bez poškození odmontovat z líhně, musel jsem její hmotnost odhadnout: 150 g. Vnější vrstva topné spirály, na které jsem prováděl průběh měření, je tvořena silikonovou pryží. Pro nastavení parametru měrné tepelné kapacity jsem využil střední tabulkové hodnoty:  $1175 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [29]. Obrázek 7.4 ukazuje nastavení diskutovaných hodnot.



Obr. 7.4 Parametry bloku pro nastavení tepelné hmoty

Další tepelné hmoty obsažené v modelované soustavě jsou vzduch a plastová komora. Parametry bloků, které je představují, jsem zjistil následovně:

- Hmotnost vzduchu:
  - Rozměry komory – 370 x 231 x 209 mm [2]
  - Hustota vzduchu – 1,1649 kg·m<sup>-3</sup> [30]
 
$$m_{vzduch} = c_{vzduch} \cdot V_{vzduch}$$

$$m_{vzduch} = 1,1649 \cdot (370 \cdot 231 \cdot 209 \cdot 10^{-9})$$

$$m_{vzduch} = 0,0208 \text{ kg}$$
- Měrná tepelná kapacita vzduchu:  $c_{p,vzduch} = 1,005 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [31]
- Hmotnost plastové komory:  $m_{komora} = 1,9 \text{ kg}$  [2]
- Měrná tepelná kapacita použitého plastu:  $c_{p,plast} = 1,67 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [32]

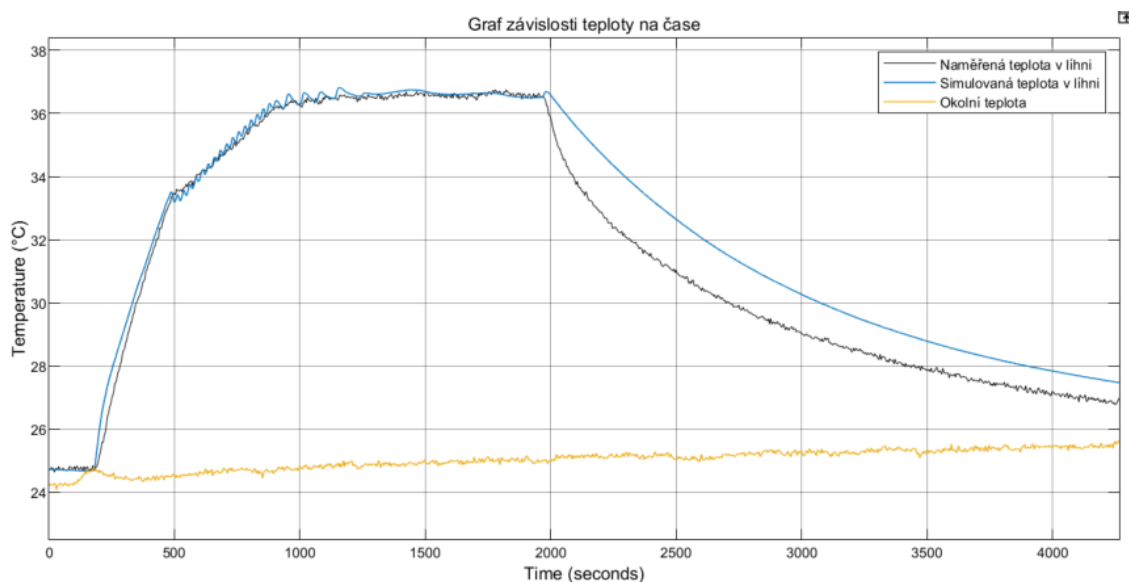
V modelu odpovídajícímu fyzické klimatické komoře – líhni bylo velmi důležité správně vystihnout koeficienty určující přestup tepla. Při jejich zadávání jsem se řídil přibližnými tabulkovými hodnotami a snažil se je nadefinovat tak, aby výsledný model co nejvíce odpovídal skutečnosti.

- Sálání: spirála – komora
  - Plocha: 211079 mm<sup>2</sup>
  - Radiační koeficient: [33]
 
$$k = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,94} - 1} = 4,826 \cdot 10^{-8}$$
- Nucená konvekce: spirála – vzduch
  - Aktivní plocha spirály: 16200 mm<sup>2</sup>
  - Součinitel přestupu tepla konvekci: 100 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> [34]
- Nucená konvekce: vzduch – komora
  - Plocha: 211079 mm<sup>2</sup>
  - Součinitel přestupu tepla konvekci: 125 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> [34]

- Kondukce komora: vnitřní + vnější strana
  - Plocha: 211079 mm<sup>2</sup>
  - Tloušťka: 0,75 mm
  - Součinitel tepelné vodivosti: 0,3 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> [22]
- Přirozená konvekce: komora – atmosféra
  - Plocha: 211079 mm<sup>2</sup>
  - Součinitel přestupu tepla konvekcí: 17,5 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> [34]

## 7.8 Výsledky a porovnání

Po vypočtení a nastavení všech materiálových konstant a rozměrů ploch nebo vzdáleností jsem přikročil k doplňování součinitelů přestupů tepla. Jelikož jsem nebyl schopen součinitele přesně vyčíslit pro danou soustavu, pracoval jsem s tolerancí rozsahu hodnot uváděných v tabulkách. Vzájemnou konfigurací parametrů přenosů jsem dosáhl modré modelové křivky, která je na obr. 7.5.

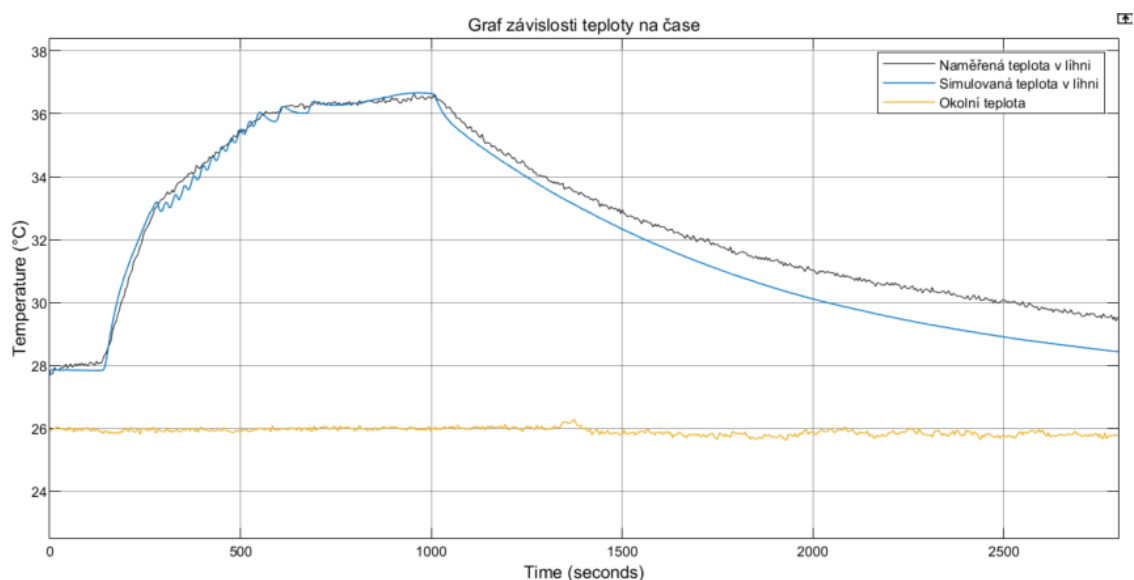


Obr. 7.5 Srovnání naměřených a modelových hodnot teploty v komoře 1

Model v porovnání se skutečným průběhem teploty (černá křivka) vykazuje silnější okamžité odezvy na výkyvy teploty topné spirály. Komora je ve skutečnosti teplotně stabilnější. Důvodem této nepřesnosti může být absence prvků, které by reprezentovaly úbytky tepla způsobené netěsností víka. Velmi problematické je i určení parametrů pro přenos tepla kondukcí komory. Víko je z jiného plastového materiálu než zbytek komory. Výpočet tloušťky komory nelze provést úplně přesně, protože není po svém celém povrchu konstantní. Dno komory má tloušťku větší než stěny. Na víku je zase připevněna veškerá elektronika. Dále model nepočítá s úniky tepla přívodním otvorem ve víku a odvodními otvory na dně komory pro přirozenou cirkulaci vzduchu. Nicméně, i přesto je modelová křivka srovnatelná se skutečným

stavem v komoře a zmíněné opomenuté skutečnosti lze při zjednodušení zanedbat. Fáze ochlazování komory je zásadně ovlivněna vypnutím ventilátoru a současně změnou dominantních působení přenosů.

Model jsem ověřil další sadou měření – obr 7.6. I zde si můžeme všimnout silných okamžitých odezev na výkyv teploty topné spirály a celkových podobných nepřesností modelu. Při ochlazování byl ventilátor tentokrát ve stavu zapnuto. Můžeme si všimnout, že tentokrát je modelové ochlazování naopak rychlejší. Menší spolehlivost modelu při ochlazování komory může být způsobena nepřesnými konstantami přestupů tepla a přílišným zjednodušením přenosů.



**Obr. 7.6 Srovnání naměřených a modelových hodnot teploty v komoře 2**

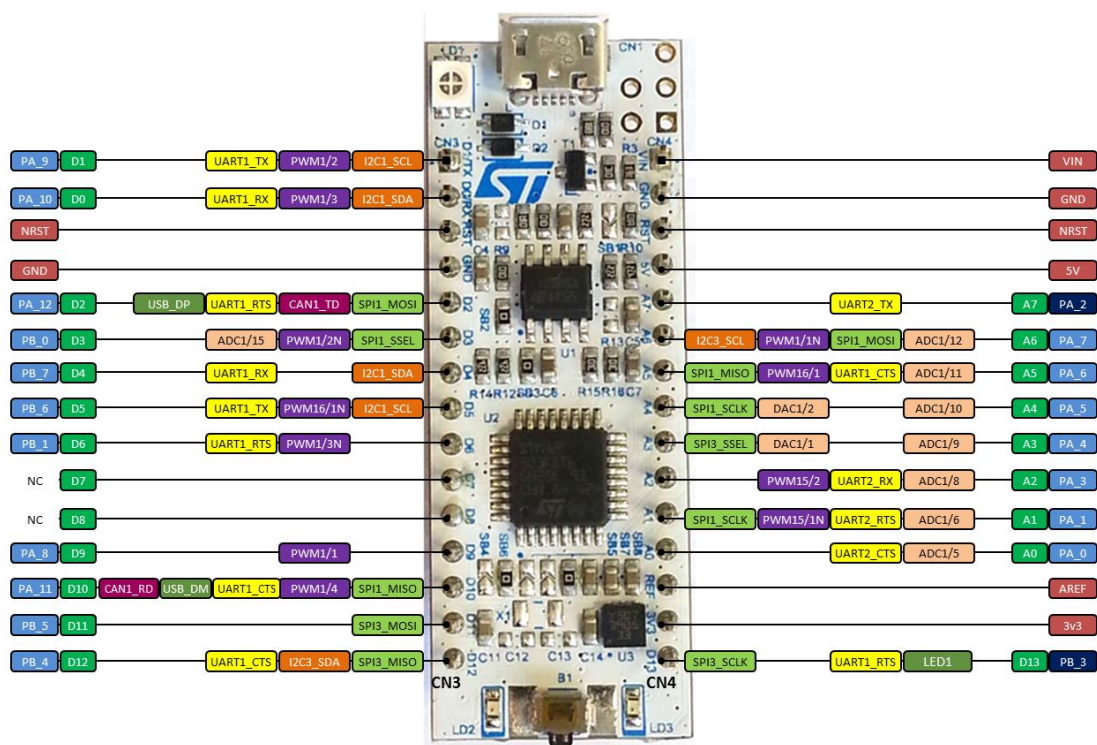
## 8 VYTVOŘENÍ DATALOGGERU

Modely, které jsou výsledkem mé bakalářské práce, jsou vytvořeny tak, aby nejlépe vystihovaly chování klimatické komory a dokázaly co nejpřesněji simulovat teplotní průběhy. Všechny výsledky vycházejí z krátkodobých měření, které trvají maximálně do dvou až tří hodin. Dosavadní měřicí aparatura poskytuje řadu výhod spočívajících zejména v zapojení celé sady snímačů a ve snadném zpracování a analýze dat. Pro komplexnější pohled na soustavu byl vytvořen externě napájený kompaktní datalogger, který umožní změřit její dlouhodobé chování.

### 8.1 Hardware

Základem hardwarové struktury dataloggeru je 32bitový mikrokontrolér STM32L412KB na vývojovém kitu Nucleo, který na sobě nese plnohodnotný debugger nazývaný ST-LINK. Zařízení je založeno na jádře typu ARM Cortex – M4, které lze taktovat až na 80 MHz. Disponuje vestavěnými paměti: až 128 kB flash a 40 kB paměti RAM. Tento mikroprocesor se řadí do skupiny s nejnižší možnou spotřebou energie, kterou lze dodávat prostřednictvím USB nebo externím 5-ti V zdrojem. Rozhraní USB také slouží pro připojení k PC se systémem Windows. Pro využívání desky je třeba mít k dispozici pouze PC s vhodným softwarem pro komunikaci. Pro programování a debuggování je na kitech implementováno rozhraní SWD (Seriál Wire Debugging), které tvoří 4 linky – GND, VCC, SWCLK a SWDIO. Konfiguraci vývojového kitu si lze prohlédnout na obr. č. 8.1. [35]





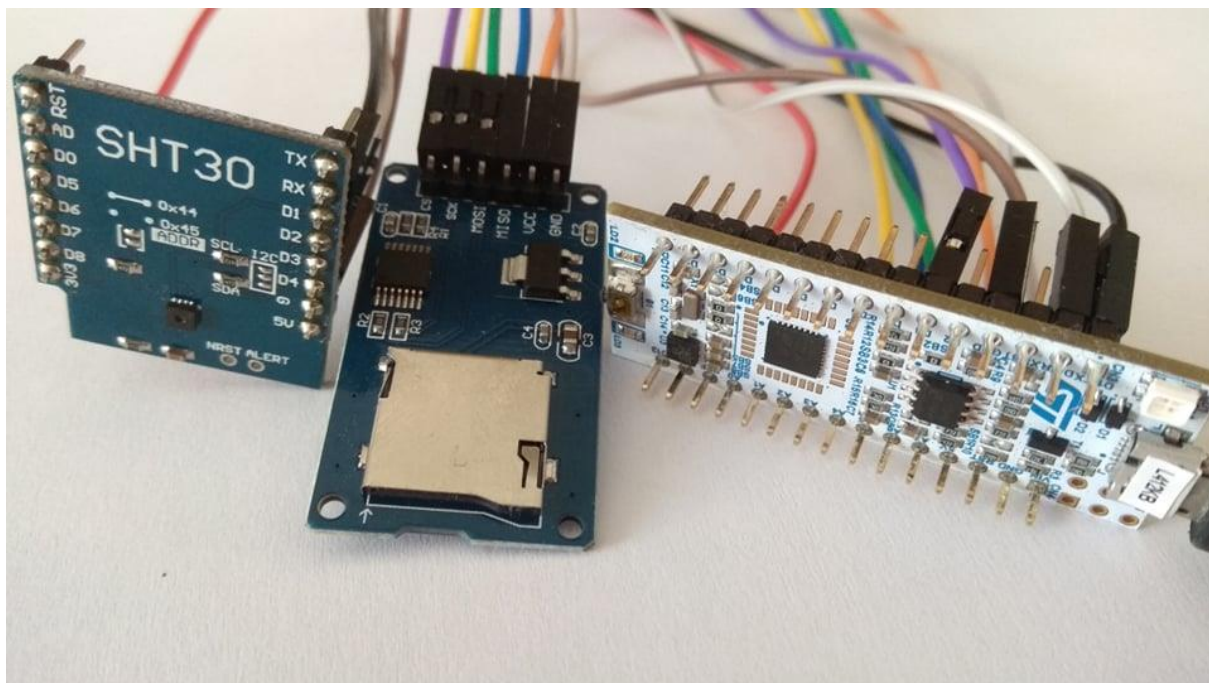
**Obr. 8.1 Konfigurace pinů NUCLEO STM32L412KB [35]**

K mikrokontroléru bylo třeba připojit několik periférních komponent a vzájemně je zkomunikovat. První z nich byl MicroSD Card Adapter. Díky externímu paměťovému modulu je datalogger schopen ukládat měření datových velikostí až 32Gb. Pro účely mé aplikace jsem použil 1Gb MicroSD kartu, která je zcela dostačující. Adaptér vyžaduje napájení 3,3 – 5V. Podporuje typy karet SD i SDHC a komunikuje přes standardní SPI sběrnici.

Pro dlouhodobou analýzu vnitřního prostředí líhně postačuje připojení jednoho snímače, který by se měl ideálně umístit do středu líhně ve výšce 2 cm nad dno. Při vývoji dataloggeru byl kladen důraz především na dlouhodobé zaznamenání chování soustavy, a proto byl použit teplotní a vlhkostní snímač SHT30. V kapitole 4 práce nabízí bližší pohled na použité snímače.

Poslední, ale velmi podstatnou součástí dataloggeru, je zajištění schopnosti poskytnutí informace o aktuálním čase. Mikrokontrolér nabízí možnost využití interního RTC (Real-Time Clock) nebo je možné informace o aktuálním čase dodávat z externího RTC modulu, konkrétně typu ZS-042. Tento modul komunikuje přes rozhraní I2C. Vysokou přesnost zajišťuje vlastní teplotně kompenzovaný oscilátor integrovaný v obvodu RTC. Modul kromě své hlavní funkce také umožňuje měření teploty a poskytuje FLASH paměť pro ukládání naměřených hodnot. Při použití baterie typu 2032 modul neztrácí údaje o čase ani po vypnutí.

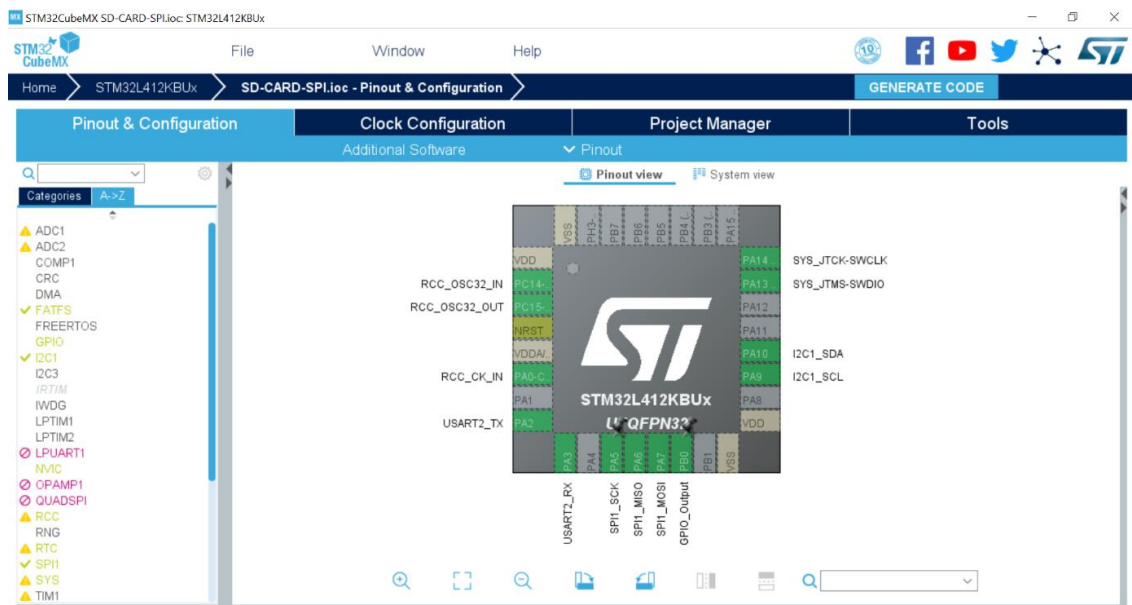
Kompletní hardwarovou sestavu ukazuje obr. č. 8.2. Nachází se zde mikrokontrolér, snímač SHT30 a MicroSD Card Adapter. Aplikace si vystačí s integrovaným RTC, proto externí modul nemusel být použit.



Obr. 8.2 Hardware pro datalogger

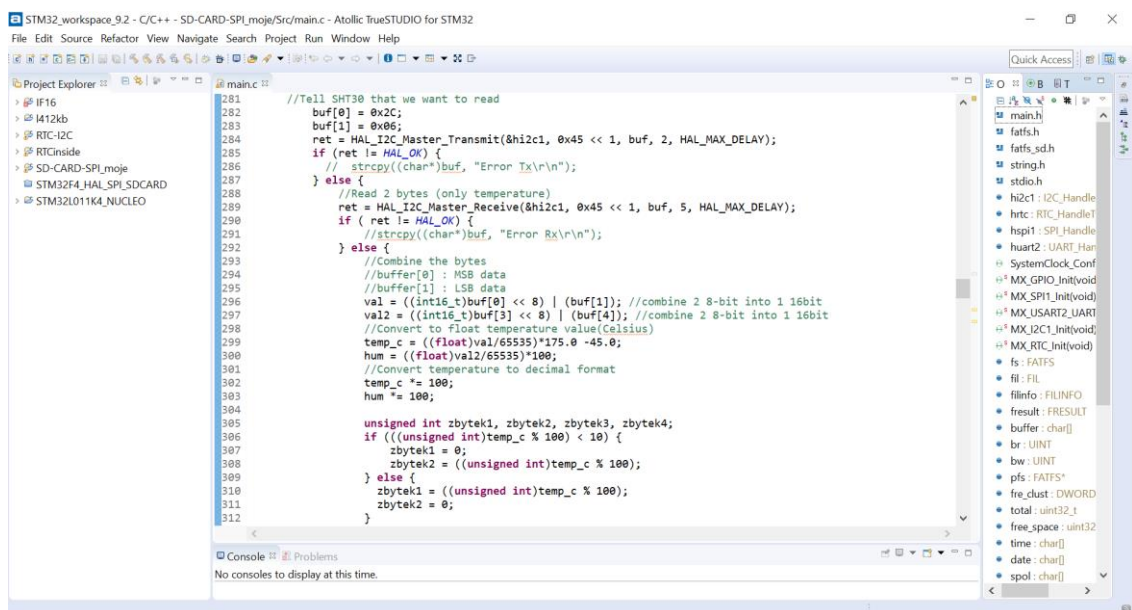
## 8.2 Software

Konfiguraci hardwaru jsem provedl v programu STM32CubeMX. Jedná se o grafický nástroj, který umožňuje snadnou konfiguraci STM32 kontrolérů a mikroprocesorů. Současně dokáže generovat odpovídající kód v jazyce C/C++ pro jádra typu ARM Cortex – M. Uživatel začne výběrem svého mikrokontroléru. Pokračuje konfigurací vyžadovaných funkcí výběrem z nabídky a přiřazením pinů. Pokud je uživatel spokojen s nastavenou konfigurací hodinového stromu a již nastavil jméno a cestu nového projektu, může vygenerovat C/C++ kód odpovídající nastavené konfiguraci. Pro lepší představu je zde přiložena konkrétní použitá konfigurace dataloggeru - obr. č. 8.3.



Obr. 8.3 Hardwarová konfigurace dataloggeru

Pro následné vytváření a správu kódu jsem využil softwaru Atollic TrueSTUDIO. Program je postaven na standardech Eclipse a GNU. Mimo jiné obsahuje programovací editor, který nabízí pokročilé funkce úpravy kódu. Dále poskytuje nástroje pro překladač a sestavení, a to optimalizovaný kompilátor C/C++, analyzátor paměti a zásobníku pro nalezení chyb, ladicí program podporující RTOS s pokročilými možnostmi sledování a mnoho dalšího. Na obr. č. .... Je viditelné prostředí Atollic TrueSTUDIO s částí kódu. Celý kód je k dispozici v příloze na CD.



Obr. 8.4 Prostředí Atollic TrueSTUDIO s částí použitého kódu

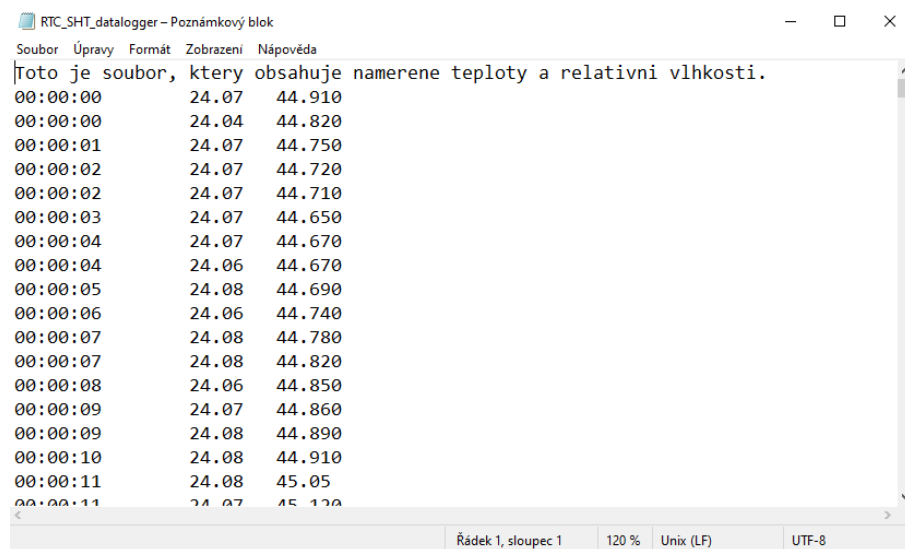
## 8.3 HAL API

Pro programování jsem využil vysokoúrovňové knihovny HAL (High Abstraction Layer). Jedná se o poměrně robustní knihovny. Jsou vzdálenější expertní vrstvě orientované blíže k hardware, kterou poskytuje knihovna LL (Low-layer). Oproti ní jsou také méně efektivní. Značné výhody ovšem poskytují v oblasti práce konfigurace jednotlivých periférií. Programátor se nemusí zabývat přímými operacemi s registry. Na obrázku 8.5 je vidět záznam uložený na SD kartě po ukončení měření. [24]

Knihovny HAL poskytují ovladače, které nabízejí bohatou sadu rozhraní pro programování aplikací (API) a dále nabízejí snadnou interakci s horními vrstvami (aplikace, knihovny, stacky). Každý ovladač se skládá z řady funkcí zajišťujících nejběžnější periferní funkce. HAL ovladače obsahují sadu ovladačových modulů, přičemž každý modul je spojen se samostatným periferním zařízením. V některých případech jsou moduly spojeny s periferními funkčními režimy. Jako příklad lze uvést periferie USART: modul ovladače UART, modul ovladače USART a další. [24]

Mezi charakteristické vlastnosti knihoven HAL patří: [24]

- Tři programovací modely API: dotazování, přerušení a DMA
- API kompatibilní s RTOS
- Podpora periferních víceinstancí, které umožňují souběžné volání API (USART1, USART2 ...)
- Všechna rozhraní HAL API implementují mechanismus funkcí zpětného volání uživatelů
- Mechanismus zamykání objektů - bezpečný hardwarový přístup, který zabraňuje vícenásobným podvodným přístupům ke sdílením zdroje
- Časový limit používání pro všechny procesy blokování: jednoduchý čítač nebo časová základna



Toto je soubor, který obsahuje naměřené teploty a relativní vlhkosti.		
00:00:00	24.07	44.910
00:00:00	24.04	44.820
00:00:01	24.07	44.750
00:00:02	24.07	44.720
00:00:02	24.07	44.710
00:00:03	24.07	44.650
00:00:04	24.07	44.670
00:00:04	24.06	44.670
00:00:05	24.08	44.690
00:00:06	24.06	44.740
00:00:07	24.08	44.780
00:00:07	24.08	44.820
00:00:08	24.06	44.850
00:00:09	24.07	44.860
00:00:09	24.08	44.890
00:00:10	24.08	44.910
00:00:11	24.08	45.05
00:00:11	24.07	45.120

Obr. 8.5 Ukázka souboru uloženého na SD kartě

## 9 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo sestavení matematického modelu klimatické komory. Text je rozdělen do několika kapitol, které na sebe navazují a dokumentují postup vypracování.

V rámci dané problematiky jsem se seznámil se strukturou a pravidly sériové komunikace I2C, pro kterou jsem vybral a otestoval vhodné snímače. Pracoval jsem s grafickým programovacím programem Labview a využil jsem jeho možnosti spolupráce se zařízením CompactRio.

Podstatnou část práce jsem věnoval vytvoření validních modelů líhně. Nejprve jsem se zaměřil na matematické modelování pomocí System Identification Toolboxu. Při identifikaci jsem nebral v úvahu vliv vlhkosti vzduchu a vycházel jsem pouze z měření výsledné teploty v komoře v závislosti na akčním zásahu topení. S respektováním požadavku na nalezení modelu s nejnižším řádem přenosové soustavy, jsem zjistil, že daná reálná soustava se dá popsat přenosovou funkcí druhého řádu. Dále jsem se soustředil na vytvoření takového modelu, který by co nejlépe vystihl všechny fyzikální zákonitosti přenosů tepla v líhni. Před vytvořením modelu v prostředí Simscape jsem provedl fyzikální analýzu tepelných přenosů. Při její implementaci do modelu jsem se setkal s několika problémy, které jsem musel řešit odhadem části parametrů z rozsahů hodnot daných tabulkou a kompenzací části analyzovaných přenosů tepla líhně.

Oba modely se ukázaly jako dostatečně přesné a využitelné pro různé druhy simulací. Pro rozšíření okruhu oblastí využitelnosti jsem poslední část práce věnoval vytvoření dataloggeru. Ten je určen pro záznam dlouhodobého měření chování líhně a vytvoření komplexnějšího pohledu na soustavu klimatické komory.



# Literatura

- [1] NXP Semiconductors. UM10204 User Manual. [online]. 2014 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [2] Rcom. Incubator Hatcher Rcom King suro MX20 User Manual. [online]. [cit. 2020-27-04]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1619140/Rcom-Kingsuro-Max-20.html#manual>
- [3] Michal Dudka. I2C – Relativně jednoduše. [online]. 2016 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/10/i2c-relativne-jednoduse/>
- [4] VŠB – Technická univerzita Ostrava. Modely a modelování [online]. [cit. 2020-27-04]. Dostupné z: [https://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%20II/skriptum/1\\_Modely\\_a\\_modelovani.PDF](https://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%20II/skriptum/1_Modely_a_modelovani.PDF)
- [5] SOS Electronic. Sensirion žije senzory [online]. 2019 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.cz/articles/sensirion/sensirion-zije-senzory-2333>
- [6] Sensirion. CMOSens® Technology: CMOSens® in Gas Sensing [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.sensirion.com/en/about-us/company/technology/cmosens-technology-in-gas-sensing/>
- [7] Sensirion. Humidity Sensors with CMOSens® [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.sensirion.com/en/about-us/technology/cmosens-technology-for-humidity/>
- [8] Creative Commons. What is Arduino? [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [9] MEASUREMENT SPECIALITIES. HTU21D(F) Sensor. Digital Relative Humidity sensor with Temperature output [online]. 2013 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899\\_HTU21D.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899_HTU21D.pdf)
- [10] Sensirion. Datasheet SHT85. Humidity and Temperature Sensor [online]. 2018 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: [https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT85\\_Datasheet-1501398.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT85_Datasheet-1501398.pdf)
- [11] Sensirion. Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15). Humidity and Temperature Sensor IC [online]. 2011 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z:

- [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/Sensirion\\_Humidity\\_SHT1x\\_Datasheet\\_V5.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/Sensirion_Humidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf)
- [12] Sensirion. Datasheet SHT3x-DIS. Humidity and Temperature Sensor. [online]. 2016 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: [https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT3x\\_Datasheet\\_digital-971521.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital-971521.pdf)
- [13] Radim FARANA, Automatizační technika, Úvod do automatizace [online]. 2017/2018 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: [https://akela.mendelu.cz/~qqfarana/ATE-PEF/ATE\\_PEF\\_01.pdf](https://akela.mendelu.cz/~qqfarana/ATE-PEF/ATE_PEF_01.pdf)
- [14] National Instruments. Labview – Getting Started with LabVIEW. [online]. 2013 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373427j.pdf>
- [15] Lenka KRETSCHMEROVÁ, Jaroslav VLACH. Programování v LabVIEW v příkladech. Liberec: TUL, 2014. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7494-167-2.
- [16] YouScribe. LabVIEW FPGA and CompactRIO Getting Started Tutorial [online]. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.youscribe.com/BookReader/Index/537728/?documentId=508851>
- [17] National Instruments Corporation. CompactRIO™ and LabVIEW™ Development Fundamentals Course Manual [online]. Course Software Version 8.2. 2007 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: [http://www.ni.com/pdf/training/us/crio\\_sample.pdf](http://www.ni.com/pdf/training/us/crio_sample.pdf)
- [18] NXP Semiconductors. PCA9547 Product data sheet. [online]. 2014 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9547.pdf>
- [19] Martin DANĚK. Programovatelná hradlová pole – FPGA [online]. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/programovatelnahradlova-pole-fpga-2006\\_02\\_30930\\_672/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/programovatelnahradlova-pole-fpga-2006_02_30930_672/)
- [20] Libor MICHALEC. Co je FPGA a proč je použít? [online]. 2019 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/zaklady-fpga-co-je-fpga-a-proc-je-pouzit.html>
- [21] Vilém SROVNAL. Přehled operačních systémů reálného času (1) [online]. AT&P journal, 2005. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2005-10-51.pdf>
- [22] The Engineering ToolBox. Plastics – Thermal Conductivity Coefficients [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:

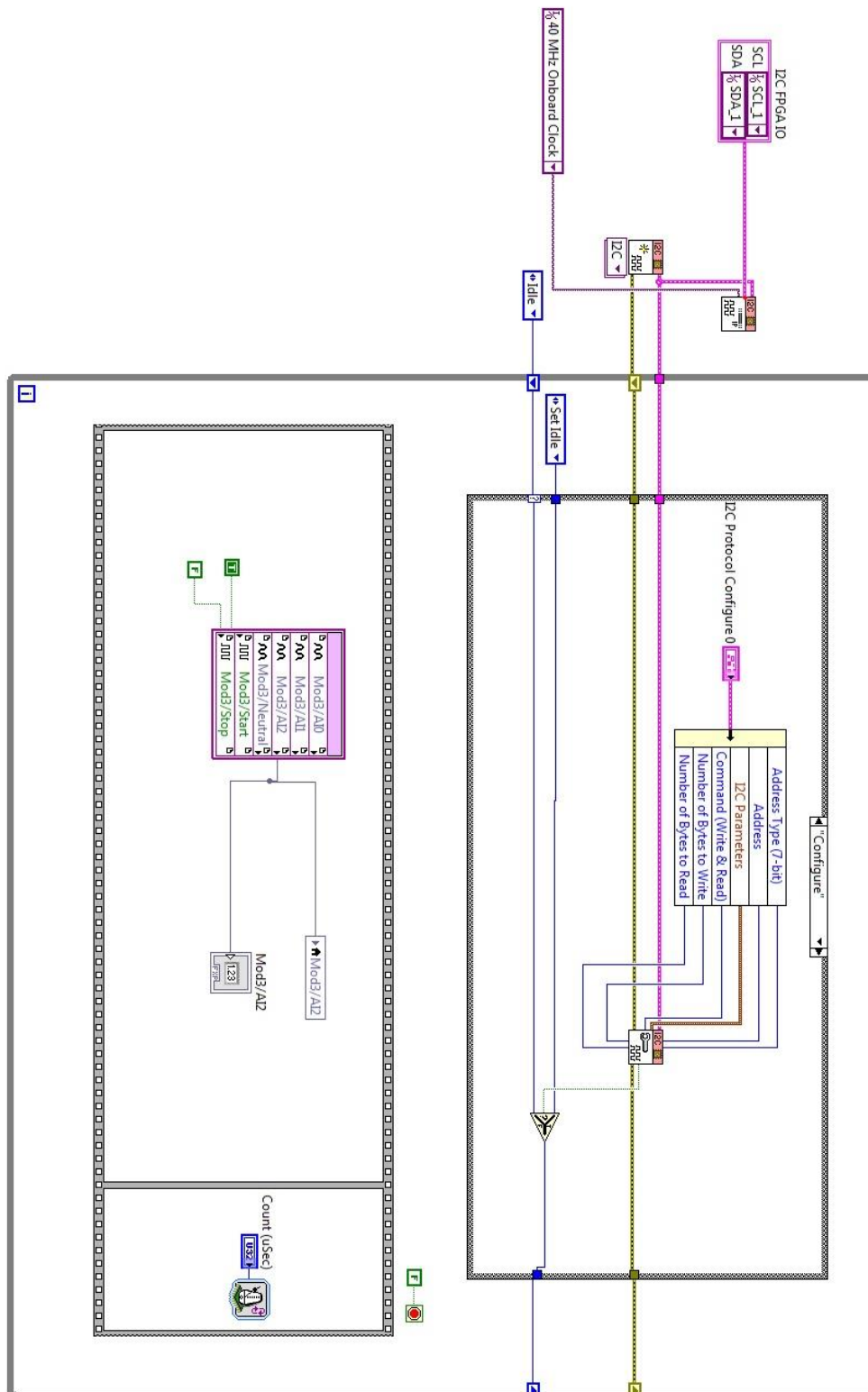
- [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-plastics-d\\_1786.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-plastics-d_1786.html)
- [23] František ŠOLC, Pavel VÁCLAVEK, Petr VAVŘÍN. Řízení a regulace II. Brno VUT, Verze 1.27, 2011. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií – Vysoké učení technické v Brně.
- [24] STMicroelectronics. UM1884 User manual [online]. 2020. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z:  
[https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00173145-description-of-stm32l4l4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00173145-description-of-stm32l4l4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf)
- [25] Humusoft. Simscape. Modelování a simulace fyzikálních systémů. [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/matlab/simscape/>
- [26] MatchWorks. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z:  
<https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/>
- [27] Ivo VOLF, Miroslava JAREŠOVÁ, Miroslav OUHRABKA. Přenos tepla [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [28] Adéla Macháčková, Radim Kocich. Sdílení Tepla a proudění [online]. Ostrava 2012 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
[http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP\\_FINAL\\_LAST.pdf](http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf)
- [29] AZO Materials. Silicone Rubber [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
<https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920>
- [30] ConVERTER. Vzduch [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [31] Ohio.edu. Specific Heat Capacities of Air [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
[https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property\\_tables/air/air\\_Cp\\_Cv.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/air/air_Cp_Cv.html)
- [32] The Engineering ToolBox. Specific Heat of Solids [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)
- [33] Vanderbilt.eu. Emissivity Table [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
[http://www.vanderbilt.eu/docs/Trebla\\_Services\\_Emissie\\_Tabel.pdf](http://www.vanderbilt.eu/docs/Trebla_Services_Emissie_Tabel.pdf)
- [34] Nuclear-power.net. Convective Heat Transfer Coefficient [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z:  
<https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/convective-heat-transfer-coefficient/>
- [35] Os.mbed.com. NUCLEO-L432KC [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z:  
<https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L432KC/>



# Seznam příloh

Příloha 1: Blokové schéma FPGA programu.....	39
Příloha 2: Čelní panel FPGA programu .....	40
Příloha 3: Čelní panel Real-Time programu .....	39
Příloha 4: Blokové schéma Real-Time subVI pro měření.....	39

# Příloha 1: Blokové schéma FPGA programu



## Příloha 2: Čelní panel FPGA programu

The screenshot displays the 'I2C Protocol Configure 0' GUI. It features a central configuration panel on the left and several monitoring fields on the right, all set against a light gray grid background.

**I2C Protocol Configure 0**

- Address:** 0
- Address Type (7-bit):** 7-bit
- I2C Parameters**
  - Clock Divider:** 0
  - Command (Write & Read):** Write & Read
  - Number of Bytes to Write:** 0
  - Number of Bytes to Read:** 0

**Mod3/AI2:** 0

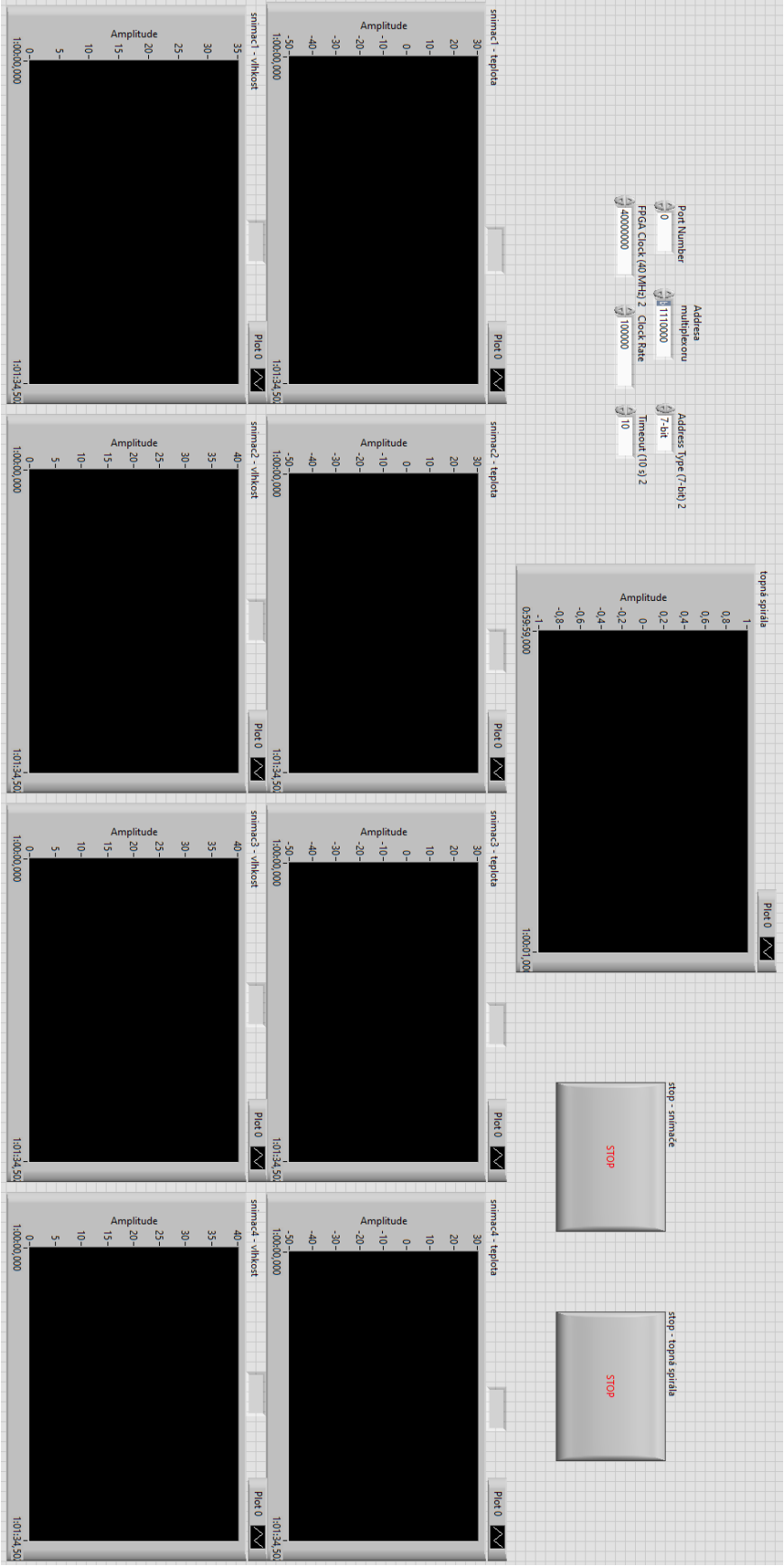
**Count(uSec):** 0

**I2C Protocol Action 0:** Idle

**I2C Protocol Input Data 0:** 0

**I2C Protocol Output Data 0:** 0

Příloha 3: Čelní panel Real-time programu



Příloha 4: Blokové schéma Real-Time subVI pro měření

